



## Solindfald gennem vinduer

**Petersen, Erwin; Korsgaard, Vagn**

*Publication date:*  
1966

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Petersen, E., & Korsgaard, V. (1966). *Solindfald gennem vinduer*. Technical University of Denmark. Byg Rapport No. 013

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE  
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

*Meddelelse nr. 13*

Erwin Petersen

# SOLINDFALD GENNEM VINDUER

Solar Heat Gain Through Windows

AKADEMISK FORLAG

1966

Fotokopi

- nr. 1 Vagn Korsgaard: Laboratoriet for Varmeisolering, 4 s.  
Særtryk af Ingeniørens Ugeblad 24. juni 1960.
- nr. 2 Vagn Korsgaard: Termisk ækvivalente ydervægge, 8 s.  
Særtryk af Ingeniøren nr. 11, 1961.
- nr. 3 Vagn Korsgaard: Den principielt rigtige opbygning af en ydervæg, 26 s. Særtryk af Husbygningsteknik 1961, udg. af Teknisk Forlag, Kbhvn.
- nr. 4 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: Solafskærmning af vinduer og måling af solindfaldet gennem forskellige typer varmeisolerende vinduesruder. Udsolgt. Særtryk af Ingeniøren nr. 3, 1962.
- nr. 5 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: Registrering af sol- og himmelstråling gennem vinduer. Særtryk af Ingeniøren nr. 9, 1962.
- nr. 6 Vagn Korsgaard, Jørgen S.R. Nielsen og Jens R. Jensen: Krydsvarmeveksleres dynamik og regulering, 174 s. Udgivet sammen med Servolaboratoriet 1962 i kommission hos Akademisk Forlag, København.
- nr. 7 Axel Rubinstein: Metoder til bestemmelse af varmeledningstal, med særlig vægt på teorien for de instationære metoder samt nogle målinger med en termosonde af egen konstruktion, 100 s. Licentiatafhandling 1963, i kommission hos Akademisk Forlag, København. (Udsolgt).
- nr. 8 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: Isoleringsevnen af nogle typiske ydervægge udsat for det naturlige klima, 77 s. I kommission hos Akademisk Forlag, København. 1964.
- nr. 9 Vagn Korsgaard og Mogens R. Byberg: El-modeller til beregning af flerdimensionale varmestrome i bygningskonstruktioner. Særtryk af Ingeniøren nr. 6, 1965.
- nr. 10 Vagn Korsgaard og Hans Lund: En passiv elektrisk analogiregnemaskine til rumklimaberegninger. Engelsk, fransk, tysk og italiensk tekst, 57 s. 1965.
- nr. 11 Vagn Korsgaard og Thomas Lund Madsen: A Method of Determining Water Vapour Transmission Through Outer Walls. 4 s. 1965.
- nr. 12 Vagn Korsgaard og Mogens R. Byberg: Driving Rain Tests With Cavity-Filled Brick Walls. 8 s. 1965.

## FORORD

Laboratoriet for Varmeisolering har i de senere år beskæftiget sig ret indgående med de termiske problemer, som opstår i forbindelse med det nyere byggeris anvendelse af store vinduer. Til brug ved arbejdet med disse problemer har laboratoriet bygget en speciel passiv el-analogregnemaskine, som er særlig velegnet til bestemmelse af det termiske rumklima og kølebehov i bygninger hidrørende fra solindfaldet. For at opnå bedst mulig overensstemmelse med de faktiske forhold er det vigtigt at kende solindfaldet gennem den givne vindueskonstruktion så nøjagtigt som muligt, da det er den altdominerende faktor i problemet. Dette opnås sikrest ved at måle på en prototype af den pågældende vindueskonstruktion. Hertil kræves et ret stort og kostbart solkalorimeter. I den foreliggende afhandling er beskrevet et sådant solkalorimeter, som er bygget ved laboratoriet. Såvel dets teori som praktiske udformning er beskrevet tillige med målinger på nogle afskærmede vindueskonstruktioner. Arbejdet er udført som et licentiat studium af civilingeniør Erwin Petersen. Da den foreliggende afhandling indeholder en udførlig beskrivelse af, hvorledes solindfaldet igennem et vindue beregnes tillige med de hertil nødvendige diagrammer i en ny og praktisk udførelse, har vi ment det berettiget at mangfoldiggøre afhandlingen, så den kan købes af arkitekter og rådgivende ingeniører samt andre interesserede.

Lyngby, april 1966.

Vagn Korsgaard

# INDHOLDSFORTEGNELSE

|       |  |    |        |   |     |
|-------|--|----|--------|---|-----|
| 0.    | Indledning                                     |    | 7.     | Usikkerhedsoverslag   | 53  |
| 1.    | Solstrålingen                                  | 7  | 7.1    | Ubestemtheden på den målte varmemængde                                | 53  |
| 1.1   | Den direkte solstråling                        | 7  | 7.2    | Ubestemtheden på det totale solindfald                                | 57  |
| 1.2   | Himmelstrålingen                               | 12 | 7.3    | Ubestemtheden når målingen sker med ventilation                       | 60  |
| 1.3   | Reflekteret stråling                           | 17 | 7.4    | Ubestemtheden på afskærmningsfaktoren                                 | 60  |
| 2.    | Måling af solstrålingens intensitet            | 20 | 8.     | Kontrolmålinger   | 62  |
| 2.1   | Solarimetret                                   | 20 | 9.     | Målinger med solkalorimetret  | 71  |
| 2.2   | Termosøjlen                                    | 22 | 9.1    | Forsøgsgangen   | 71  |
| 3.    | Transmission af solstråling gennem en glasrude | 24 | 9.2    | Beregning af kortbølget stråling                                      | 75  |
| 3.1   | Reflekteret stråling                           | 25 | 9.3    | Beregning af afskærmningsfaktoren                                     | 75  |
| 3.2   | Absorberet stråling                            | 26 | 10.    | Måleresultater  | 77  |
| 3.3   | Transmitteret stråling                         | 27 | 10.1   | Solafskærmende rude   | 79  |
| 4.    | Afskærmningsmetoder                            | 31 | 10.2   | Hvidt gardin  | 80  |
| 4.1   | Absorberende og reflekterende ruder            | 31 | 10.3   | Persienner  | 91  |
| 4.2   | Indvendig afskærmning                          | 32 | 10.3.1 | Indvendig persienne   | 91  |
| 4.3   | Udvendig afskærmning                           | 32 | 10.3.2 | Udvendig persienne  | 103 |
| 5.    | Afskærmningsfaktoren                           | 33 | 11.    | Beregning af solindfald på en væg eller gennem et vindue              | 115 |
| 5.1   | Definition på afskærmningsfaktoren             | 33 | 11.1   | Definition på vinkler   | 115 |
| 5.2   | Andre definitioner på afskærmningsfaktoren     | 34 | 11.2   | Solstrålingen   | 121 |
| 6.    | Måling af solindfaldet gennem et vindue        | 36 | 11.3   | Solindfald gennem et vindue   | 122 |
| 6.1   | Solkalorimetret                                | 36 | 11.4   | Beregning af solindfald ved hjælp af soldiagram                       | 125 |
| 6.2   | Kalorimetrets konstruktion                     | 38 | 11.5   | Skygge af udhæng på lodret væg  | 128 |
| 6.3   | Vandcirkulationen                              | 42 | 11.6   | Transmissionstab  | 131 |
| 6.4   | Ventilationssystemet                           | 44 | 11.7   | Afskærmningsfaktorer  | 131 |
| 6.5   | Måling af termospendinger                      | 44 | 12.    | Konklusion  | 137 |
| 6.6   | Kalorimetrets varmebalance                     | 47 | 13.    | Appendix  |     |
| 6.6.1 | Varme fjernet af kølevandet                    | 47 | A.     | Glasrudens varmeveksling med omgivelserne                             | 139 |
| 6.6.2 | Varmetab gennem væggene og randen              | 48 | B.     | Måling af strålingstemperaturen i det fri                             | 150 |
| 6.6.3 | Kalorimetrets varmekapacitet                   | 50 | C.     | Justering af termoelementtråd og vandmålere                           | 153 |
| 6.6.4 | Varmetab gennem ruden                          | 50 | D.     | Beregning af den diffuse strålings transmission gennem en dobbeltrude | 157 |
| 6.6.5 | Varme fjernet ved ventilation                  | 51 | 14.    | Resumé  | 159 |
|       |  |    |        | Summary   | 161 |
|       |  |    |        | Symbolliste   | 163 |
|       |  |    |        | Litteraturfortegnelse   | 164 |

## 0. INDLEDNING

Selv om solen til tider synes at være en sjælden gæst på vore breddegrader, kan den, når den endelig kommer, hurtigt overophede rummene bag de glasfacader, der er så moderne i nutidens arkitektur. Da bygningerne ofte samtidig har vægge og loft af lette konstruktioner med ringe varmeakkumuleringssevne, forværres situationen yderligere.

Med tiden har man imidlertid, for at formindske solindfaldet, udviklet et stort antal mere eller mindre effektive solafskærmninger. Ved valg af afskærmning og ved dimensionering af luftkonditioneringsanlæg må man nødvendigvis kende afskærmningens effektivitet. I de senere år er der foretaget en del målinger af forskellige afskærmningers effektivitet ved Laboratoriet for Varmeisolering, men måleudstyret har begrænset udvalget af de undersøgte afskærmninger. Denne mangel har man rådet bod på ved konstruktionen og bygningen af et solkalorimeter, ved hjælp af hvilket man direkte kan sammenligne solindfaldet gennem en almindelig dobbeltrude og en given solafskærmende vindueskonstruktion.

I U.S.A og flere steder i Europa er der foretaget lignende undersøgelser. Resultaterne af disse kan nok anvendes ved grovere beregninger, men er ikke fyldestgørende ved en nøjere analyse af problemerne. Der tænkes her især på de data, laboratoriets analogiregneskærm skal bruge ved løsning af opgaver vedrørende et rums termiske indendørsklima. Desuden fremkommer der stadig nye afskærmningsmetoder, der skal undersøges.

De målinger, der er foretaget med solkalorimetret i sommerhalvåret 1965, skal mere tages for en afprøvning af solkalorimetret end en afsluttet undersøgelse af de valgte afskærmninger, idet sommerens bundrekord i antallet af solskinstimer har forårsaget visse mangler i målematerialet.

## 1. SOLSTRÅLINGEN

Den kortbølgede stråling, som rammer et fladeelement ved jordoverfladen, kan opdeles i tre grupper, nemlig den direkte stråling  $a$ , den diffuse himmelstråling  $b$  og den reflekterede stråling  $c$  fra jordoverfladen og genstande på denne. Den direkte og diffuse himmelstråling benævnes globalstrålingen, mens  $(a + b + c)$  benævnes totalstrålingen.

### 1.1 Den direkte solstråling

Solens temperatur er ca.  $6000^{\circ}\text{K}$ , og den udsender en stråling med en spektralfordeling, som stort set svarer til den stråling, som udsendes af et absolut sort legeme med denne temperatur. Inden strålingen trænger ind i jordens atmosfære, er spektrets nedre og øvre grænse henholdsvis  $0,2\mu$  og  $3\mu$ , og energimaksimum ligger ved ca.  $0,5\mu$ . Spektret kan groft deles i tre områder, nemlig det ultraviolette, det synlige og det infrarøde. Den ultraviolette stråling ligger i området med bølgelængder under  $0,38\mu$ , den synlige stråling mellem  $0,38\mu$  og  $0,78\mu$  og den infrarøde stråling over  $0,78\mu$ . Den synlige stråling udgør knapt halvdelen af den totale stråling.

Fig. 1 kurve a viser spektralfordelingen af solstrålingen, inden den trænger ind i atmosfæren. Ved integration af denne kan man bestemme den totale strålingsintensitet på et fladeelement vinkelret på strålingen uden for atmosfæren. Denne strålingsintensitet er varierende, dels på grund af variationer i den udsendte stråling og dels på grund af variationer i afstanden mellem sol og jord. Når jorden befinder sig i middelastanden fra solen, benævnes den dertil svarende strålingsintensitet for solarkonstanten  $S_0$ . I litteraturen ses den ofte angivet med en størrelse på ca.  $1160 \text{ kcal/hm}^2$ . Nyere amerikanske målinger (Johnson 1954) angiver den til  $1200 \text{ kcal/hm}^2$  med en usikkerhed på  $\pm 2\%$ .

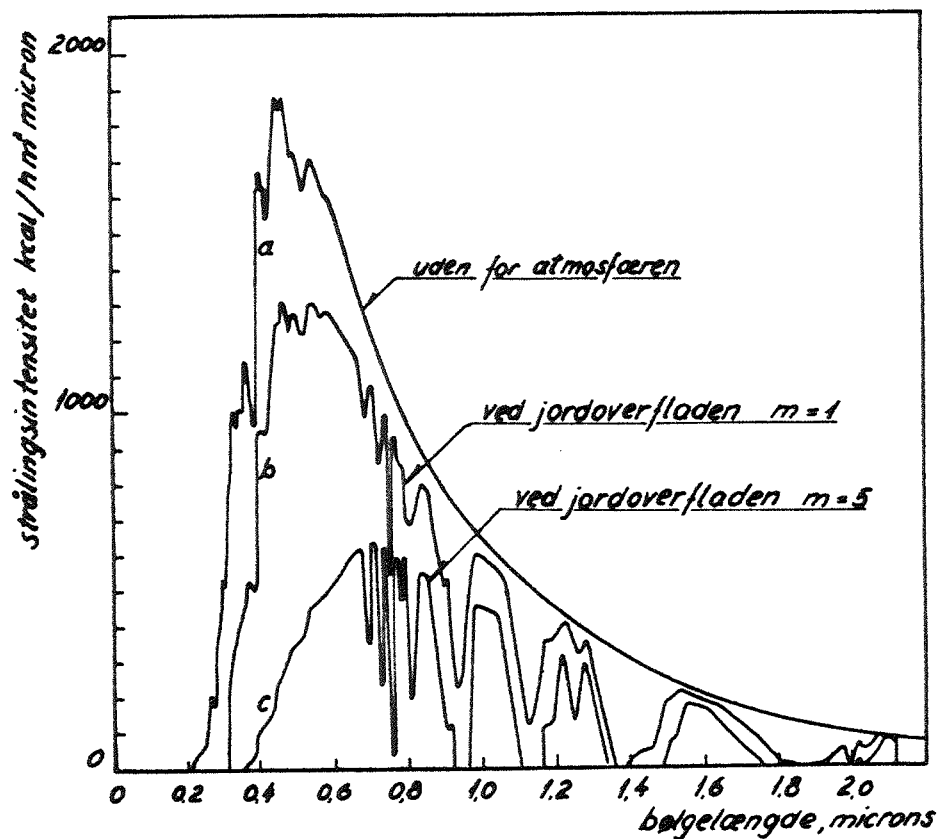


Fig. 1. Spektralfordelingen af den direkte solstråling på en normalflade uden for atmosfæren og ved jordoverfladen ved tilstanden 30 mm udfældeligt vand og 400 støvpartikler pr.  $\text{cm}^2$ .

Spectral distribution of direct solar radiation at normal incidence for the upper limit of the atmosphere and at the surface of the earth, for conditions at 30 mm of precipitable water and 400 dust particles per cc.

Idet strålingsintensiteten på fladeelementet ændrer sig omvendt proportionalt med kvadratet på afstanden mellem sol og jord, kan strålingsintensiteten  $S_a$ , svarende til en bestemt afstand  $a$ , bestemmes af udtrykket

$$S_a = \frac{1}{R^2} \cdot S_0,$$

hvor  $R$  er forholdet mellem afstanden  $a$  og middelfastheden. På fig. 2 er faktoren  $1/R^2$  afbildet som funktion af årstiden. Det ses, at strålingsintensiteten er ca. 7% større i december end i juni.

På vejen gennem atmosfæren aftager strålingsintensiteten, idet der dels sker en svækkelse af hele spektret på grund af extinktion, d.v.s. brydning, spredning og refleksion i atmosfæren, og dels en selektiv absorption.

Den førstnævnte svækkelse sker, når strålingen rammer molekyler og partikler, der er mindre end bølgelængden. Extinktionen er ifølge Rayleigh's lov omvendt proportional med 4. potens af bølgelængden, d.v.s. den kortbølgede del af spektret spredes relativt mere end den langbølgede del. Dette er forklaringen på himmelens blå farve og solnedgangens røde farver.

Atmosfærens indhold af vanddamp og kuldioxid forårsager en udpræget båndabsorption i det infrarøde område. Da kuldioxids båndabsorption ligger i området med  $\lambda$  større end  $2\mu$ , har denne dog ingen større indflydelse på den totale absorption.

Atmosfærens indhold af ozon påvirker derimod spektrets kortbølgede del, idet den forårsager en kraftig absorption af de ultraviolette stråler, især i området med  $\lambda$  mindre end  $0,3\mu$ .

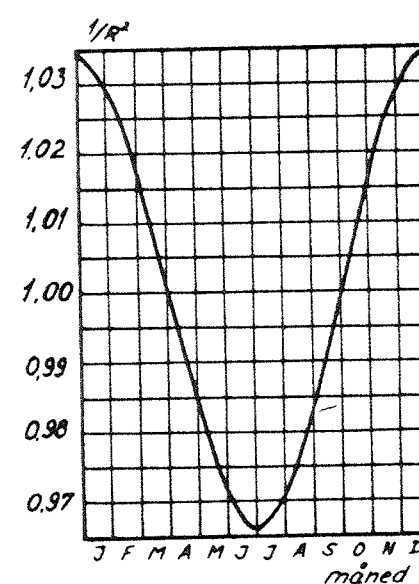


Fig. 2. Forholdet mellem strålingen uden for atmosfæren og solarkonstanten som funktion af årstiden.

Ratio of radiation at the outer limit of the atmosphere to the solar constant as a function of time of year.

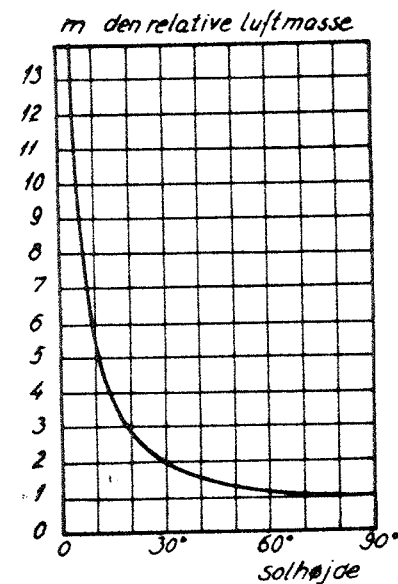


Fig. 3. Sammenhæng mellem luftmasse og solhøjde.

Relationship between air mass and altitude angle of the sun.

Parry Moon [1] har opstillet nogle udtryk ved hjælp af Rayleigh's teori til beregning af størrelsen af den stråling, som spredes af atmosfærens molekyler og partikler. Ud fra disse og en række forske- res målinger af solstrålingsintensiteten og af vanddamps og ozons absorption af strålingen har han beregnet spektralfordelingen og den totale stråling, som når jordoverfladen ved en given atmosfæretil- stand.

Atmosfærens vandindhold angives i enheden mm udfældeligt vand, hvorved forstås højden af den vand søjle, man ville få, hvis man for- tættede al vanddamp i den overliggende atmosfære. Ozonindholdet an- gives i mm ozon, hvorved forstås højden af den ozon søjle, man ville få, hvis man samlede al ozon i den overliggende atmosfære i normal- tilstanden.

Den vejlængde, solstrålingen skal tilbagelægge gennem atmosfæren, angives relativt i forhold til vejlængden gennem atmosfæren vinkelret på jordkuglen og kaldes den relative luftmasse  $m$ . En god tilnærmelse for dette forhold  $m$  er for solhøjder  $h$  større end  $15^\circ$  lig  $1/\sin h$ .

Fig. 3 viser  $m$  som funktion af solhøjden.

Fig. 1 viser resultatet af en beregning af den stråling, som når jordoverfladen, når atmosfæren indeholder 30 mm vand og 400 støvpar- tikler pr.  $\text{cm}^3$ . Kurve b gælder for  $m = 1$  svarende til, at solen står i zenith, og kurve c gælder for  $m = 5$  svarende til en solhøjde på ca.  $11^\circ$ . Arealet under kurverne angiver størrelsen af hele strålings- intensiteten. For  $m = 1$  er forholdet mellem strålingsintensiteten uden for atmosfæren og ved jordoverfladen 0,63, og for  $m = 5$  er for- holdet 0,28. Man lægger især mærke til, at det er i den kortbølgede del af området, at der sker den største svækkelse.

Luftens indhold af støvpartikler er især stor over industriområder og storbyer. Det kan således nævnes, at et støvindhold på 200 p. pr.  $\text{cm}^3$  repræsenterer en temmelig ren atmosfære, mens 800 p. pr.  $\text{cm}^3$  re- præsenterer en industriatmosfære.

Det fremgår af det foregående, at de forskellige faktorer vil give nogle variationer i størrelsen af den strålingsintensitet, som når jordoverfladen, og i høj grad vil være afhængig af stedets geografi- ske beliggenhed.

P. Moon [1] har beregnet en standardkurve for den strålingsinten- sitet, som når jordoverfladen, når man har middelfast mellem sol

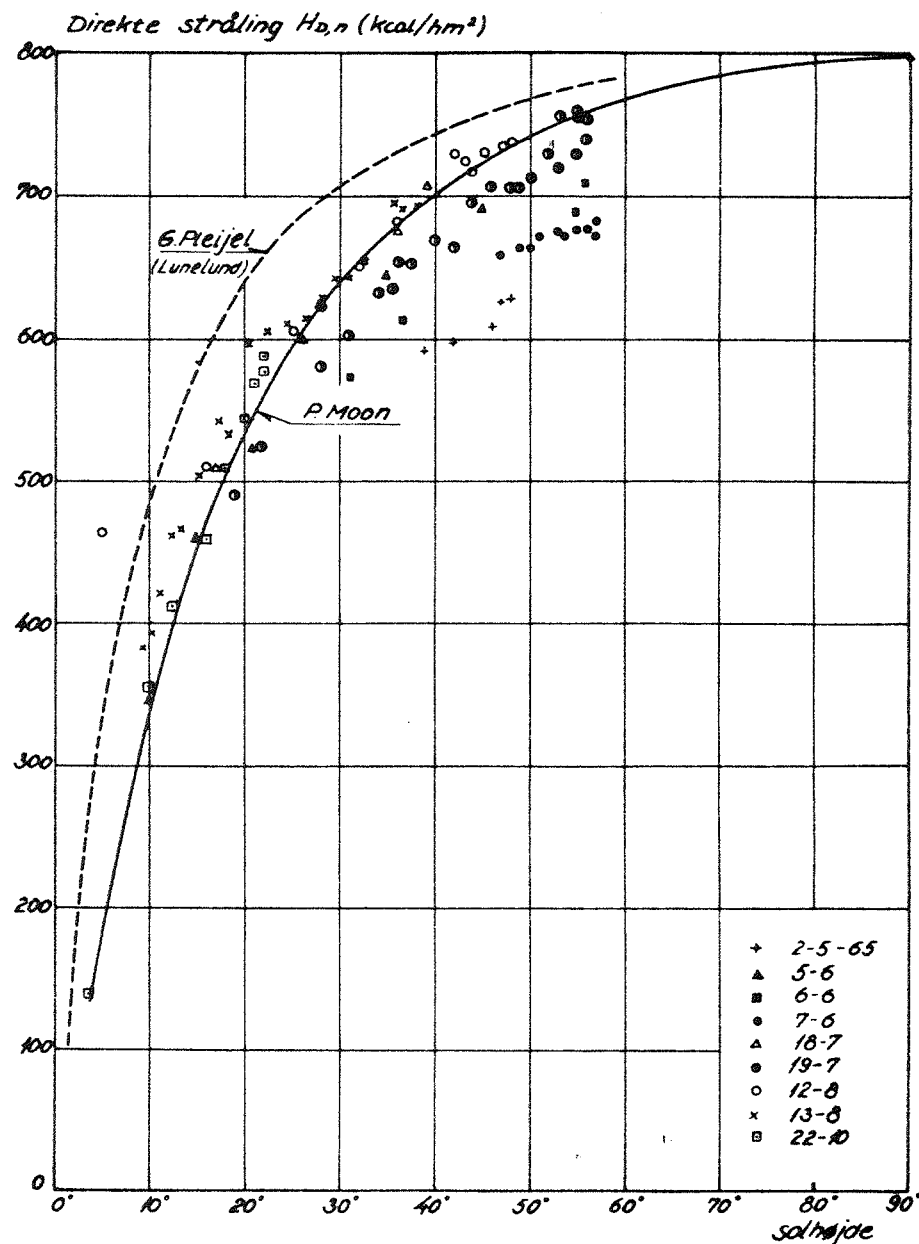


Fig. 4. Intensiteten af direkte solstråling på klare dage vinkelret på strålingsretningen.

Intensity of direct solar radiation on clear days at normal incidence.

og jord. Som standard benyttes en atmosfære ved 760 mmHg med 20 mm vanddamp, 300 støvpartikler pr. cm<sup>3</sup> og 2,8 mm ozon. Strålingsintensiteten af den direkte stråling på en normalplan til stråleretningen ved havniveau er afbildet på fig. 4.

De mest udførlige observationer, der er gjort i Norden, er foretaget af Lunelund i Helsingfors (1927-33). G. Pleijel har på grundlag af disse målinger beregnet gennemsnitsværdien for strålingsintensiteten fra solen på klare dage som funktion af solhøjden [2]. Af disse gennemsnitsværdier har G. Pleijel endvidere lavet en tabel over solindfaldet ved forskellige breddegrader [3]. Pleijel's værdier er afbildet på fig. 4.

F.M. Tonne [4] har sammenlignet nogle målinger, udført af H. Hinzpeter i Potsdam (1937-42) og W. Kaempfert, med P. Moon's standardkurve og har fundet god overensstemmelse.

Ved Laboratoriet for Varmeisolering foretager man systematiske målinger af solindfaldet gennem en lodret dobbelt rude, men ingen måling af den direkte solstråling. Ved målingerne, der er udført med solkalorimetret i 1965, har man imidlertid målt den direkte solstrålingsintensitet. Disse målinger er afbildet på fig. 4. Målingerne, som er foretaget om efteråret, viser god overensstemmelse med Moon's kurve, mens sommermålingerne ligger noget lavere. Til gengæld var den diffuse stråling større ved sommermålingerne end ved efterårs-målingerne, hvilket tyder på en større forurening af luften i måledagene om sommeren.

### 1.2 Himmelstrålingen

En del af den stråling, som spredes af atmosfæren, rammer jordoverfladen som diffus stråling. Fra en skyfri himmel vil strålingens spektralkurve have samme nedre grænse som den direkte stråling, mens den øvre grænse ligger ved 1,0 μ. Energimaksimum ligger ved 0,45 μ.

Størrelsen af den direkte og den diffuse stråling, som rammer jordoverfladen, er indbyrdes afhængige. Hvis  $S_a$  er strålingsintensiteten uden for atmosfæren,  $H_{D,n}$  er den direkte strålingsintensitet på normalplanen til strålingen ved jordoverfladen,  $h$  er solhøjden, og  $H_{d,v}$  er den diffuse himmelstråling på en vandret plan, har man

$$H_{d,v} = \kappa(S_a - H_{D,n})\sinh, \quad (1.2.1)$$

hvor  $\kappa$  er en faktor, der næsten er konstant [5]. Ved målinger ved Frankfurt am Main har G. Reitz fundet  $\kappa$  beliggende mellem 0,31 og 0,35. F. Bernhardt og H. Philipps har på grundlag af målinger i Potsdam bestemt  $\kappa$  til 0,36.

I U.S.A benytter man et analogt udtryk til bestemmelse af den diffuse stråling [6]

$$H_{d,v} = K[(S_a - H_{D,n})\sinh - H_{a,v}], \quad (1.2.2)$$

idet man har medtaget et led  $H_{a,v}$ , som korrektion for den stråling, som atmosfæren absorberer på grund af dens indhold af vanddamp. Værdien af  $K$  angives til 0,5. Når vandindholdet er kendt, kan  $H_{a,v}$  bestemmes af et diagram [6].

Ved egne målinger den 22/10-65 ved Hjortekær målte man den direkte stråling og den diffuse stråling på en vandret plan og en lodret plan med normalen beliggende i solstrålerens indfaldsplan. De målte værdier, samt beregning af  $\kappa$  og  $K$ , er indført i nedenstående skema. Atmosfærens vandindhold er beregnet ved hjælp af data fra Meteorologisk Instituts radiosonde (fig. 5).

Skema 1.2

| Solhøjde | $H_{D,n}$            | $H_{d,v}$ | $H_{d,l}$ | $\kappa$ | $K$  |
|----------|----------------------|-----------|-----------|----------|------|
|          | kcal/ m <sup>2</sup> |           |           |          |      |
| 22,5     | 578                  | 70        | 110       | 0,30     | 0,50 |
| 22,0     | 589                  | 71        | 116       | 0,32     | 0,53 |
| 21,0     | 569                  | 70        | 113       | 0,32     | 0,51 |
| 20,0     | 544                  | 68        | 113       | 0,31     | 0,50 |
| 18,0     | 509                  | 65        | 113       | 0,31     | 0,50 |
| 16,0     | 460                  | 68        | 113       | 0,34     | 0,53 |
| 12,5     | 411                  | 53        | 75        | 0,32     | 0,51 |
| 10,0     | 356                  | 43        | 56        | 0,30     | 0,46 |
| 3,5      | 139                  | 20        | 20        | 0,31     | -    |

De målte værdier af  $\kappa$  og  $K$  er i god overensstemmelse med de værdier, litteraturen angiver. En mangel ved resultaterne er imidlertid, at man kun har målinger fra denne ene dag.

Beregner man  $\kappa$  ved hjælp af de data, der er angivet for den direkte og diffuse stråling ved 56 °N af G. Pleijel [3], finder man



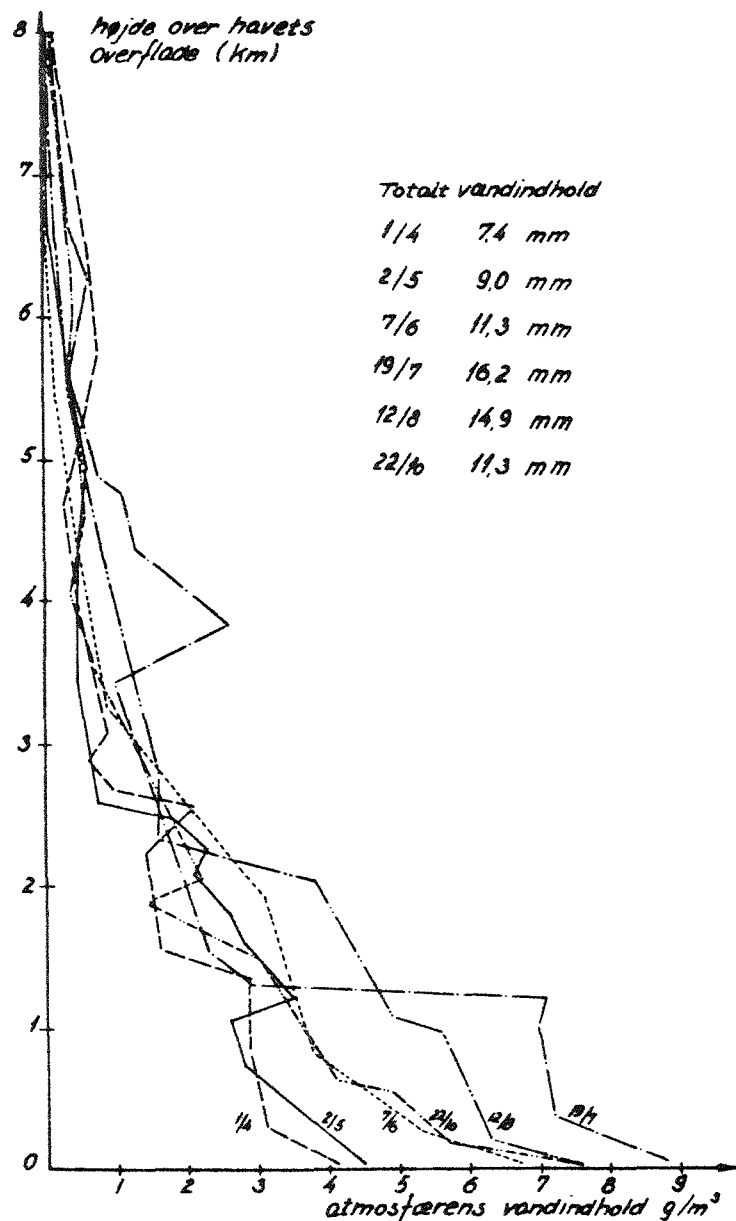


Fig. 5. Fordelingen af atmosfærens vandindhold som funktion af højden over havets overflade.

Distribution of water of the atmosphere as a function of elevation above sea-level.

for hele året, at  $\kappa$  ligger mellem 0,24 og 0,27. Da tabellerne er baseret på Lunelunds målinger i Helsingfors, er årsagen til de små værdier for  $\kappa$  antagelig, at atmosfærens vandindhold og forurening er mindre i Helsingfors på daværende tidspunkt. Den direkte stråling er derfor også tilsvarende større (fig. 4).

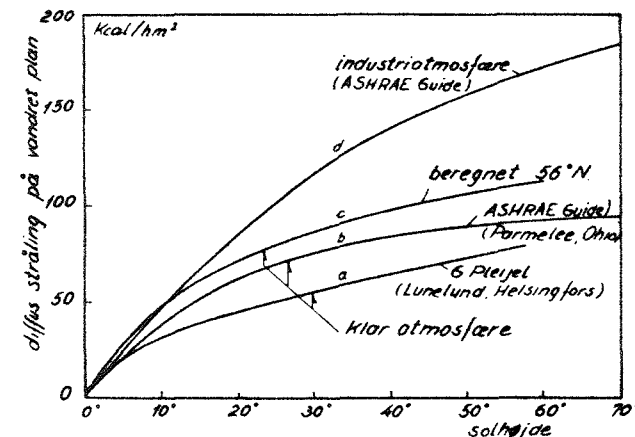


Fig. 6. Himmelstrålingsintensiteten på en vandret plan som funktion af solhøjden.

The diffuse sky-radiation incident upon a horizontal surface as a function of altitude angle of the sun.

På fig. 6 er tegnet den diffuse himmelstråling på en vandret plan som funktion af solhøjden. Kurve a er tegnet efter G. Pleijel [3], kurve b og d er tegnet efter værdier fra ASHRAE Guide 1965 (Parmelee's målinger) og kurve c er beregnet af ligning (1.2.1) for  $\kappa = 0,33$ .

Himmelstrålingen er ikke jævnt fordelt over himmelhvælvingen, idet den er størst omkring solen. Man kan stort set dele himmelstrålingen i to dele. Den ene del af strålingen er koncentreret omkring det sted på himlen, hvor solen står, og den aftager med vinklen til solen. Den anden del har sit maksimum i horisonten og aftager med voksende højde. Summen af disse to bidrag giver et maksimum omkring solen og et minimum på den modsatte del af himmelhvælvingen. Fig. 7 viser et eksempel på den relative strålingstæthed på himmelhvælvingen ved en solhøjde på  $20^\circ$ . Enheden er strålingstætheden i zenit. Fig. a er meridiansnittet gennem solen, mens fig. b er projektionen på en vandret plan [4].

For en overskyet himmel gælder det, at maksimum ligger i zenit og minimum i horisonten.

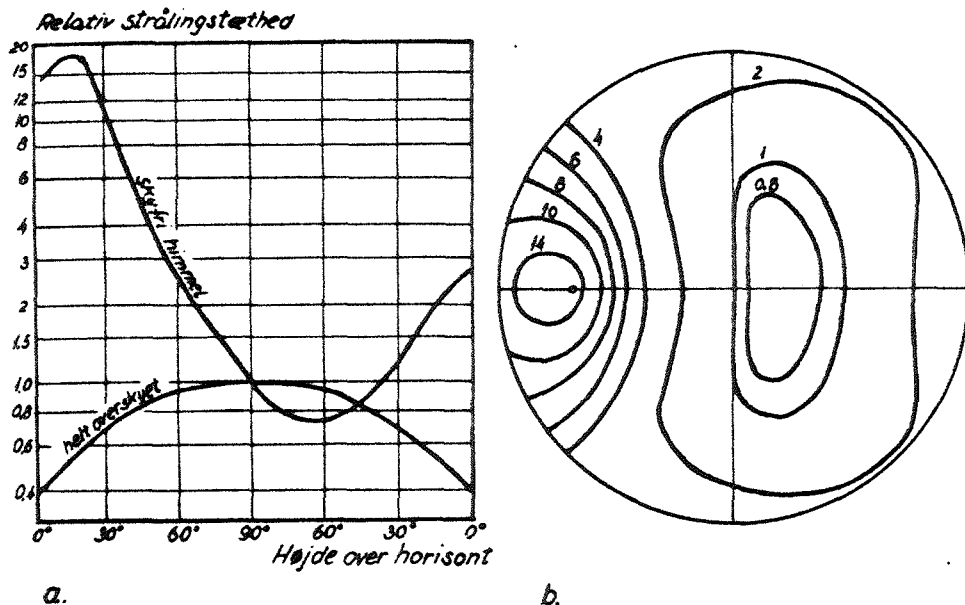


Fig. 7. Forholdet mellem den diffuse himmelstrålings tæthed på himmelhvælvingen og i zenit ved solhøjden  $20^\circ$ .

Ratio of the diffuse sky-radiation density on the celestial concave to the density in zenith at  $20^\circ$  of altitude angle of the sun.

Fig. 8a viser en måling fra Minneapolis [6] af den diffuse himmelstråling, som rammer nogle facader med forskellig orientering. (Den diffuse stråling er eksklusiv reflekteret stråling fra jordoverfladen). På grundlag af en række af sådanne målinger har Threlkeld fundet en sammenhæng mellem solstrålingens indfaldsvinkel og forholdet mellem den diffuse himmelstråling på en vandret flade og den diffuse himmelstråling på en lodret flade. På fig. 8b er dette forhold afbildet som funktion af cosinus til solens indfaldsvinkel på væggen. Forsøgsresultaterne viser, at på væggene, som ikke er solbeskinnede, er den diffuse himmelstråling lidt mindre end halvdelen af den diffuse stråling, som rammer den vandrette plan. På de solbeskinnede vægge bliver den diffuse himmelstråling op til 1,3 gange større på en lodret væg end på en vandret flade, skønt den lodrette flades vinkelforhold til himmelhvælvingen kun er 0,5 imod den vandrette flades 1,0.

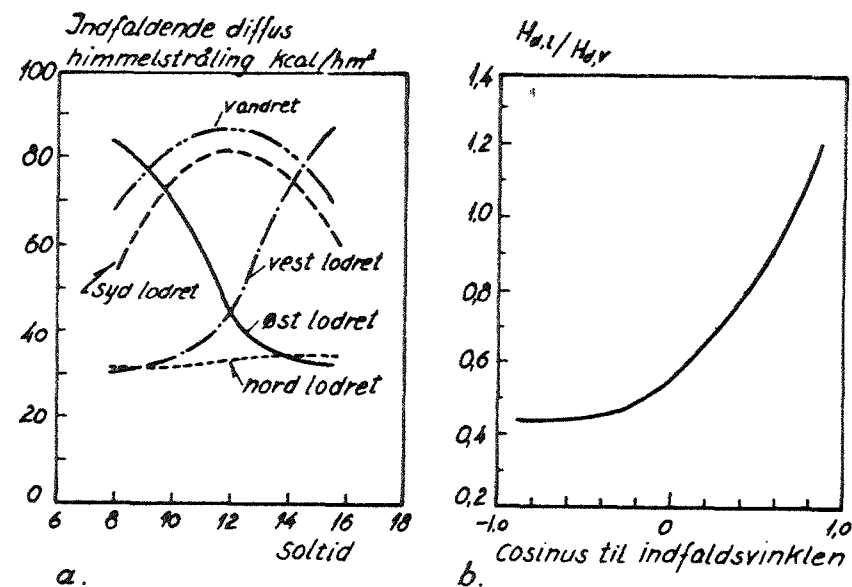


Fig. 8.

- Himmelstrålingens variation på forskellige overflader.
- Forholdet mellem himmelstrålingen som rammer en lodret flade og en vandret flade på klare dage som funktion af cosinus til indfaldsvinklen.

- Variation of diffuse solar radiation from the sky incident upon various surfaces.
- Ratio of diffuse solar radiation from the sky incident upon a vertical surface to that incident upon a horizontal surface for clear days as a function of cosine of sun's incidence angle.

F.M. Tonne angiver i [4] en metode til fremstilling af diagrammer til bestemmelse af himmelstrålingen på en lodret flade, når himmelstrålingens fordeling over himmelhvælvingen er kendt.

### 1.3 Reflekteret stråling

En skrå flade vil foruden den diffuse himmelstråling også modtage en reflekteret stråling fra jordoverfladen eller genstande på denne. Refleksionen vil i de fleste tilfælde kunne antages at ske fuldstændig diffust, d.v.s. uafhængig af indfaldsvinklen.

Størrelsen af den reflekterede stråling er afhængig af den indfaldende strålingsintensitet og refleksionskoefficienten  $\rho$ . Størrelsen af den reflekterede stråling, som rammer den skrå flade, er endvidere bestemt af fladens vinkelforhold til den strålende flade.

En lodret væg modtager således den diffuse reflekterede stråling  $H_{d,r}$  udtrykt ved

$$H_{d,r} = \varphi \rho (H_{D,n} \sin h + H_{d,v}) , \quad (1.3.1)$$

hvor  $\varphi$  er vinkelforholdet,  $H_{D,n}$  er den direkte solstrålingsintensitet på normalplanen til strålerne,  $h$  er solhøjden, og  $H_{d,v}$  er den diffuse himmelstråling på den vandrette plan. Hvis udstrækningen af den reflekterende vandrette flade er stor, er  $\varphi = 0,5$ .

I nedenstående tabel er angivet nogle refleksionskoefficienter  $\rho$  for forskellige overflader.

Tabel 1.3

|   |         |
|---|---------|
| Ny sne  | 0,85    |
| Gammel sne                                    | 0,4-0,7 |
| Lyse farver, gult og lyst rødt tegl           | 0,5     |
| Beton, mørkt rødt tegl, vissent græs og buske | 0,3     |
| Græs, buske og løvskov, lyst sand             | 0,25    |
| Sand, makadam, lys skifer                     | 0,20    |
| Nåleskov                                      | 0,15    |
| Asfalt, skifer, fugtig ubevokset mark         | 0,10    |

I skema 1.2 er indført de målte værdier for den diffuse stråling på en vandret og lodret plan. Ved solhøjden  $22^\circ$  har man således  $H_{D,n} = 589 \text{ kcal/hm}^2$ ,  $H_{d,v} = 71 \text{ kcal/hm}^2$  og  $H_{d,l} = 116 \text{ kcal/hm}^2$ .

Ifølge fig. 8b bliver den diffuse himmelstråling på den lodrette plan  $H_{d,v} \cdot 1,25 = 71 \cdot 1,25 = 89 \text{ kcal/hm}^2$ . Da jordoverfladen foran planen er en lys, tør pløjemark, sættes  $\rho$  til 0,20. Den diffuse reflekterede stråling, som rammer den lodrette plan, fås af ligning (1.3.1)

$$H_{d,r} = 0,5 \cdot 0,20 (589 \cdot \sin 22^\circ + 71) = 29 \text{ kcal/hm}^2$$

Total diffus stråling på lodret plan er  $89 + 29 = 118 \text{ kcal/hm}^2$ , hvilket stemmer med den målte værdi på  $116 \text{ kcal/hm}^2$ . Hvis man regner med, at himmelstrålingen er jævnt fordelt over halvkuglen, ville den diffuse himmelstråling på den lodrette plan kun blive  $0,5 \cdot 71 \approx 36 \text{ kcal/hm}^2$  i stedet for  $89 \text{ kcal/hm}^2$ .

Ved beregning af solindfaldet gennem vinduer kan den diffuse stråling i nogle tilfælde være betydelig i forhold til den direkte stråling. Betragter man f.eks. et sydvendt vindue kl. 12 en dag med solhøjden  $57^\circ$ , har man  $H_{D,n} = 763 \text{ kcal/hm}^2$  og  $H_{d,v} = 112 \text{ kcal/hm}^2$ . Den diffuse himmelstråling på den lodrette væg bliver (fig. 8b)  $0,85 \cdot 112 = 95 \text{ kcal/hm}^2$ .

Hvis jordoverfladen er en græsmark med  $\rho = 0,25$ , bliver den reflekterede diffuse stråling på den lodrette væg

$$H_{d,r} = 0,5 \cdot 0,25 (763 \sin 57^\circ + 112) = 94 \text{ kcal/hm}^2$$

Den totale diffuse stråling på den lodrette væg bliver  $95 + 94 = 189 \text{ kcal/hm}^2$ . Den direkte stråling på den lodrette væg bliver  $763 \cdot \cos 57^\circ = 416 \text{ kcal/hm}^2$ . Idet transmissionskoefficienten for den direkte og diffuse stråling for en dobbeltrude er henholdsvis 0,68 og 0,69, bliver den transmitterede stråling henholdsvis

$$H_{D,trans} = 0,68 \cdot 416 = 283 \text{ kcal/hm}^2$$

$$H_{d,trans} = 0,69 \cdot 189 = 130 \text{ kcal/hm}^2$$

Forsynes vinduet med en udvendig persienne, der har en afskærmningsfaktor på 0,03 for den direkte stråling og 0,35 for den diffuse stråling (fig. 65), bliver transmissionen gennem det afskærmede vindue følgende

$$\text{direkte stråling: } H_{D,trans} \cdot 0,03 = 283 \cdot 0,03 = 8 \text{ kcal/hm}^2$$

$$\text{diffus stråling: } H_{d,trans} \cdot 0,35 = 130 \cdot 0,35 = 46 \text{ kcal/hm}^2$$

Den diffuse strålings bidrag til den totale transmitterede stråling er i dette tilfælde væsentlig større end den direkte strålings bidrag.

I litteraturen ser man ofte den diffuse reflekterede stråling helt udeladt og himmelstrålingen kun medtaget af principielle grunde. I visse tilfælde kan dette, som det fremgår af ovenstående eksempel, give anledning til betydelige fejl.

## 2. MÅLING AF SOLSTRÅLINGENS INTENSITET

### 2.1 Solarimetret

Til måling af den kortbølgede strålings intensitet anvendes dels et solarimeter og dels en termosøjle.

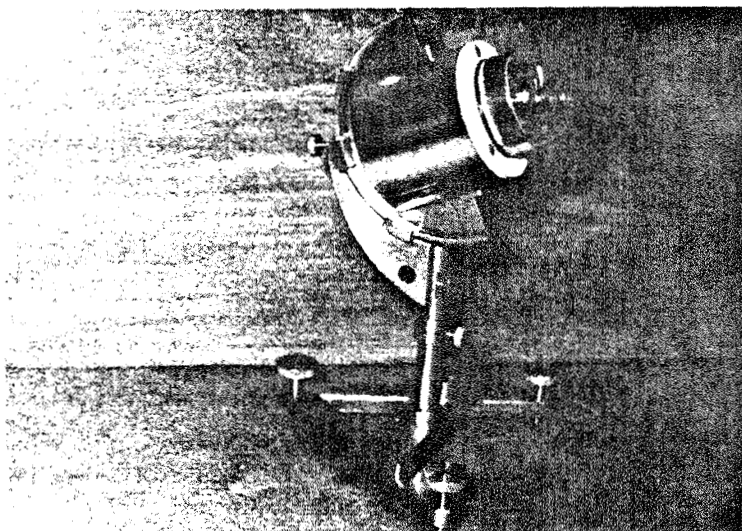


Fig. 9. Solarimeter. (Kipp og Zonen)

Fig. 9 viser et solarimeter. Princippet i målingen er, at det cirkulære sorte fladeelement opvarmes af solstrålingen, hvorved det antager en overtemperatur i forhold til omgivelserne. Denne overtemperatur måles ved hjælp af en termoelementkæde og er et direkte mål for strålingsintensiteten. Fladeelementet er beskyttet af to halvkugler af en speciel glassort, Jena glas K5, der kun absorberer en meget lille del af den kortbølgede stråling. Fig. 10 viser transmissionskoefficienten (ekskl. refleksion) for den del af strålingen, som trænger ind i glasset.

Fladeelementets varmebalance er bl.a. afhængig af glaskuplernes temperatur. På grund af deres ringe absorption af den kortbølgede

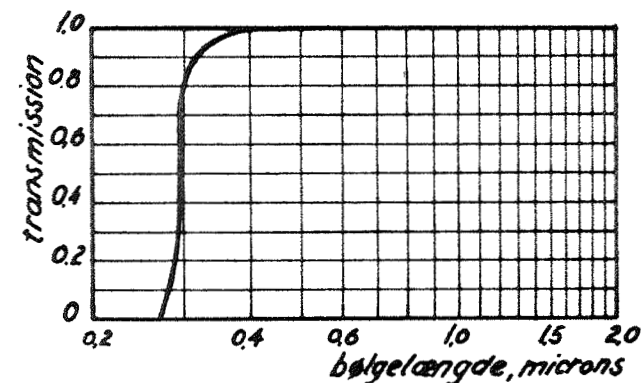


Fig. 10. Netto transmissionskoefficienten for solarimetrets glaskupler (Jena glas K 5).

Net-transmission-coefficient of glass domes of the solarimeter.

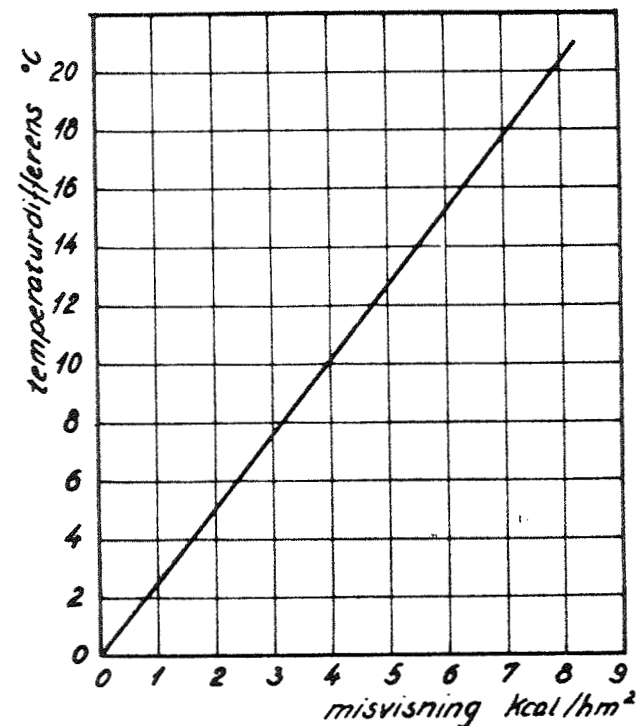


Fig. 11. Solarimetrets misvisning på grund af langbølget stråling.

Deviation of the solarimeter on account of the low temperature radiation.

stråling bliver de ikke opvarmet af denne. Anbringes solarimetret derimod over for en flade, der er varmere end dette, vil den langbølgede stråling bevirke, at glaskuplerne antager en overtemperatur, der påvirker fladeelementets varmeveksling med disse. I dette tilfælde vil solarimetret give for lille visning.

Solarimetrets misvisning på grund af langbølget stråling er fundet ved forsøg og vist på fig. 11.

Solarimetret registrerer både den direkte stråling og den diffuse kortbølgede stråling inden for en rumvinkel på  $2\pi$ . Man kan imidlertid skille de to strålingsformer ad ved at udelukke den direkte stråling. Dette sker ved hjælp af en sort kugle med  $d = 15$  cm, som holdes mellem solen og solarimetret i en afstand af 2 m.

Kipp og Zonen angiver, at kalibreringskonstanten er bestemt med en nøjagtighed på 1-2%. Solarimetrets visning stemmer inden for 2% med den kortbølgede stråling, som bestemmes ved hjælp af solkalorimetret.

## 2.2 Termosøjlen

Til måling af en retningsbestemt stråling benyttes en termosøjle (compensated thermopile, Kipp og Zonen). Termosøjlen er forsynet med et rør og en blende, der bestemmer rumvinklen. Princippet ved målin-

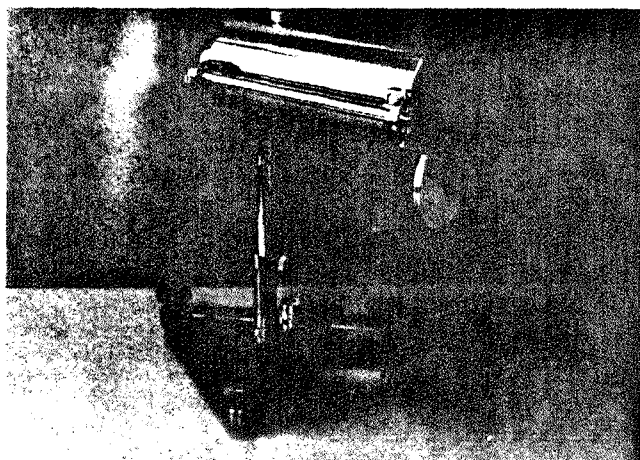


Fig. 12. Termosøjle. (Kipp og Zonen)  
Thermopile.

gen er det samme som ved solarimetret. Ved hjælp af filtre, som skydes ind i strålegangen, kan man bestemme spektralfordelingen af den stråling, som transmitteres gennem en vindueskonstruktion. Termosøjlen benyttes endvidere til måling af den reflekterede retningsbestemte stråling.

### 3. TRANSMISSION AF SOLSTRÅLING GENNEM EN GLASRUDE

Når solstrålingen rammer en glastrude, vil en del blive reflekteret, en del absorberet og en del transmitteret. Den brøkdel af strålingen, som reflekteres, angives med refleksionsfaktoren  $R$ , mens den brøkdel som absorberes og transmitteres henholdsvis angives med faktorerne  $A$  og  $T$ . Summen af den reflekterede, transmitterede og absorberede stråling er lig den indfaldende stråling. Man har således

$$R + A + T = 1$$

Den absorberede stråling vil bevirke, at glassets temperatur stiger, indtil der opnås en ligevægtstilstand mellem den absorberede varme og den varme, som afgives ved konvektion og langbølget stråling til omgivelserne. Den del af den absorberede varme, som afgives til rummet fra glastrudens indvendige side, betegnes den sekundære transmitterede stråling i modsætning til den direkte transmitterede stråling, som betegnes den primære transmitterede stråling.

Hvis  $H_D$  og  $H_d$  er henholdsvis den direkte og diffuse indfaldende stråling, kan den totale transmitterede stråling skrives som

$$H_{\text{total}} = [T_D H_D + T_d H_d] + [N_1 A_D H_D + N_2 A_d H_d]$$

hvor  $N_1$  og  $N_2$  er den brøkdel af den absorberede stråling, som afgives til rummet fra glassets indvendige side.

Størrelsen af  $R$ ,  $A$  og  $T$  er afhængig af glassorten, indfaldsvinklen og strålingens spektralfordeling.

På fig. 13 er vist transmissionsfaktoren  $T$  for en 6 mm alm. glastrude ved indfaldsvinklen 0 som funktion af bølgelængden. Glas er uigennemtrængelig for stråling med bølgelængder større end  $4,5\mu$ , d.v.s. hele den langbølgede stråling, som ruden normalt modtager fra omgivelserne. Den ultraviolette stråling absorberes næsten totalt af alm. glas.

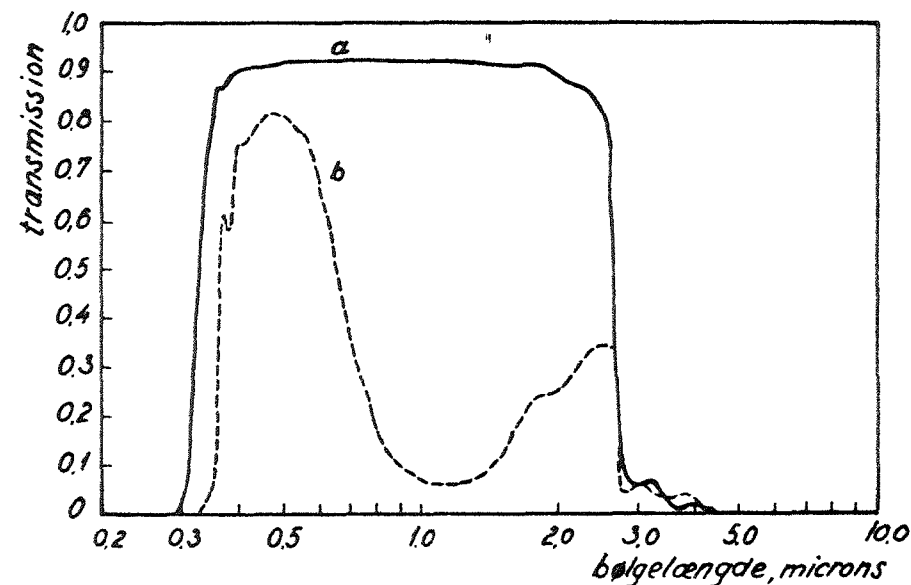


Fig. 13. Strålingstransmission gennem a) 6 mm glas med 0,02%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  og b) 6,5 mm varmeabsorberende glas med 0,5%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Radiation transmission through a) 6 mm glass with 0,02%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and b) 6,5 mm heat absorbing glass with 0,5%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

#### 3.1 Reflekteret stråling

Ud fra den elektromagnetiske bølgeteori kan man udlede et udtryk til bestemmelse af forholdet mellem den reflekterede og den indfaldende stråling (Fresnels formler)

$$R_1 = \frac{\sin^2(i_i - i_b)}{\sin^2(i_i + i_b)} \quad R_2 = \frac{\text{tg}^2(i_i - i_b)}{\text{tg}^2(i_i + i_b)}$$

Udtrykket for  $R_1$  og  $R_2$  gælder for planpolariseret lys, hvis elektriske vektorer svinger henholdsvis vinkelret på og i indfaldsplanen.  $i_i$  er indfaldsvinklen og  $i_b$  er brydningsvinklen.

Sollyset er sammensat af lys, som tilnærmelsesvis svinger lige ofte i begge polarisationsretninger, d.v.s. refleksionsfaktoren  $R$  for sollys bliver middelværdien af  $R_1$  og  $R_2$ . På fig. 14 er afbildet refleksionen ved en luft-glasovergang som funktion af indfaldsvink-

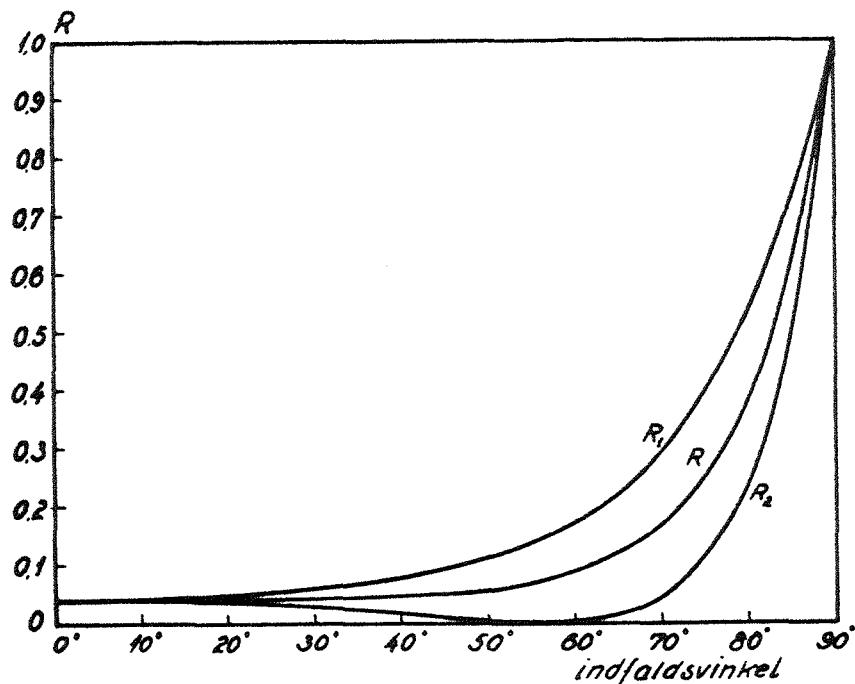


Fig. 14. Refleksion af direkte stråling fra en enkelt overflade som funktion af indfaldsvinklen.

Reflection of direct solar radiation from a single surface as a function of angle of incidence.

len. Ved en glas-luftovergang sker der en tilsvarende refleksion, således at den totale refleksion fra en enkelt glastrude bliver ca. 8% ved indfaldsvinklen 0.

### 3.2 Absorberet stråling

Ved monokromatisk stråling er den energi, der absorberes af glasset, en funktion af strålingens vejlængde gennem glasset og glassets egenskaber. Strålingsintensiteten  $H_\lambda$  vil over en lille vejlængde  $ds$  gennem glasset blive formindsket med størrelsen  $dH_\lambda$ , idet man har

$$dH_\lambda = -K_\lambda H_\lambda ds,$$

hvor  $K_\lambda$  er en stofkonstant for glasset.

Hvis intensiteten af strålingen, når den trænger ind i glasset, er  $H_{\lambda,0}$ , vil den efter at have trængt længden  $s$  ind i glasset være

$$H_\lambda = H_{\lambda,0} \cdot e^{-K_\lambda s} \quad \text{eller}$$

$$H_\lambda = H_{\lambda,0} \delta_\lambda^s,$$

idet  $\delta_\lambda$  er en konstant for glasset. Størrelsen

$$\frac{H_\lambda}{H_{\lambda,0}} = \delta_\lambda^s$$

betegnes nettotransmissionskoefficienten og konstanten  $\delta_\lambda$  er nettotransmissionskoefficienten for glastykkelsen  $s = 1$  mm.

I amerikansk litteratur angives glassets absorptionssegenskaber ved størrelsen af eksponenten  $K_\lambda \cdot s$ , hvor  $K_\lambda$  benævnes absorptionskoefficienten.

### 3.3 Transmitteret stråling

Når strålingens spektralfordeling og glassets absorption af stråling af forskellig bølgelængde er kendt, kan man således beregne, hvor meget af den indfaldende stråling der absorberes i glasset. Den brøkdel  $T$  af den indfaldende stråling, som transmitteres gennem glasset, kan da findes af

$$T = 1 - R - A.$$

Glasruderne i solkalorimetret er termoruder af 2 stk. 4 mm glas med 12 mm mellemrum. Ved hjælp af to solarimetre har man målt, at 73,5% af den kortbølgede stråling, som rammer glasset ved indfaldsvinklen 0, transmitteres gennem glasset (primær transmission). De to solarimetre er ved denne måling fastgjort henholdsvis udenfor og indenfor ruden med målefladerne parallelle med denne. Ved hjælp af disse måles den totale kortbølgede stråling, som rammer og som transmitteres gennem ruden. Endvidere måles den diffuse stråling, som rammer og som transmitteres gennem ruden, idet den direkte stråling udelukkes som tidligere beskrevet. Den direkte stråling bestemmes da af differensen mellem de to målinger.

Idet nettotransmissionskoefficienten for alm. glas ikke varierer nævneværdigt med bølgelængden i solspektrets område, kan vi benytte formlerne for refleksion og absorption til beregning af størrelsen af den stråling, som transmitteres gennem termoruden ved forskellige

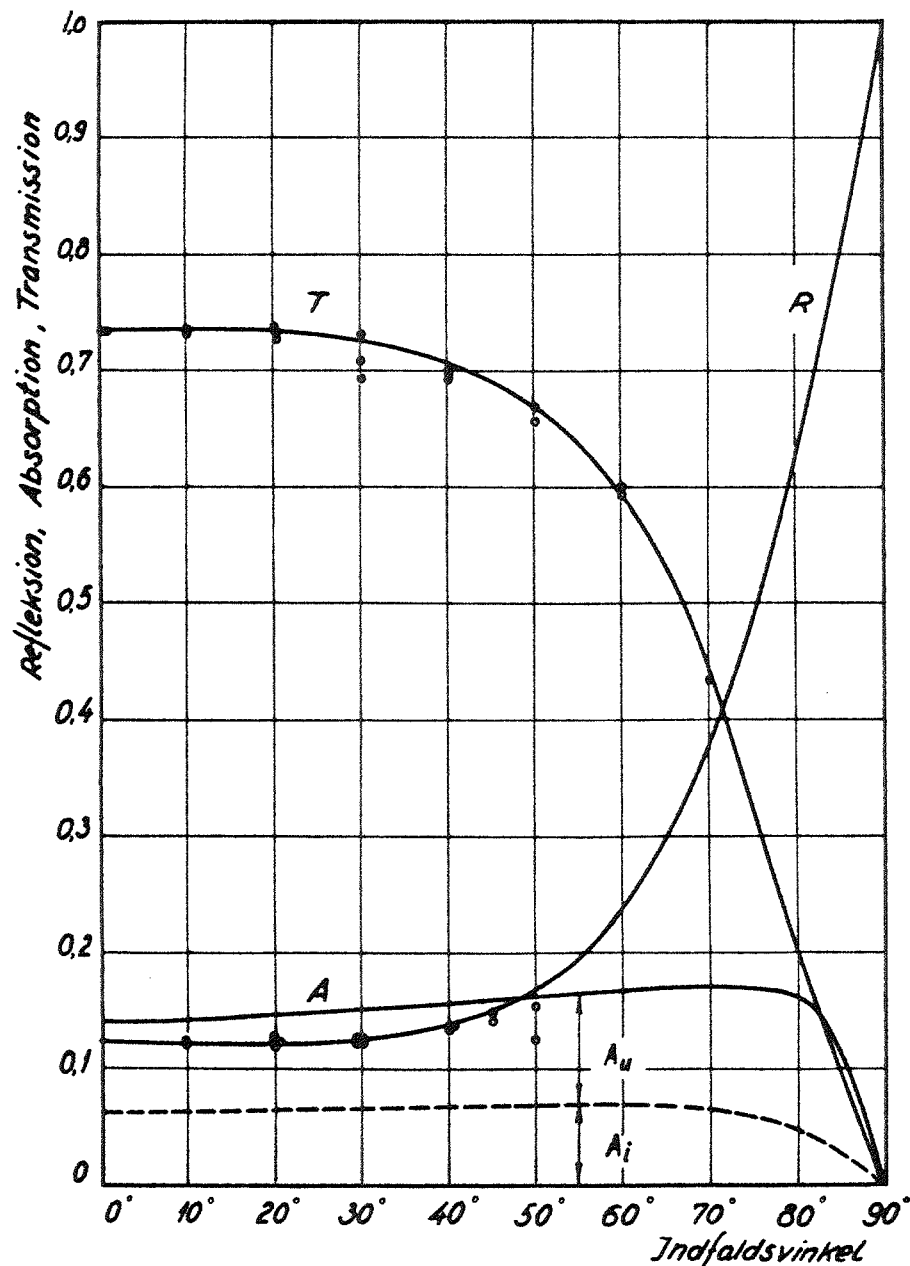


Fig. 15. Kurver over transmissionen, refleksjonen og absorptionen af direkte solstråling for en dobbelt rude af alm. glas som funktion af indfaldsvinklen.

Curves for transmission, reflection and absorption of direct solar radiation by a double pane of common glass as a function of angle of incidence.

indfaldsvinkler. På fig. 15 er afbildet resultatet af beregningen af faktorerne R, A og T for termoruden. Absorptionen er endvidere delt i absorptionen i den indvendige og udvendige rude. Ved beregningerne er der taget hensyn til reflektioner af højere orden. På fig. 15 er endvidere indtegnet nogle målte værdier af R og T for den direkte stråling.

Hvis man gør den tilnærmelse at antage, at den diffuse stråling er ensartet fordelt over hele det halvrum, vinduet ser, kan man beregne T for den diffuse stråling. I appendix D er T beregnet til 0,63 svarende til, at strålingens indfaldsvinkel gennemsnitlig er  $56^\circ$ . Dette stemmer overens med de målinger, der er foretaget af T for den diffuse stråling, idet disse varierer mellem 0,66 og 0,58, afhængig af rudens orientering i forhold til solen.

Afgivelsen af den absorberede stråling fra den indvendige og udvendige side af glasset er en funktion af det indvendige og udvendige overgangsmodstandstal, idet det er forudsat, at der er samme temperaturforhold på begge sider af ruderne. Den udvendige overgangsmodstand kan variere en del på grund af den tvungne konvektion. Ved målingerne med solkalorimetret, der svarer til normale sommerforhold, antager det udvendige overgangsmodstandstal værdier omkring  $0,08 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ \text{C/kcal}$ , mens det indvendige er  $0,15 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ \text{C/kcal}$ . Idet den absorberede varme i den udvendige og indvendige rude fordeles efter overgangsmodstandene, finder man, at 80% af den absorberede stråling i den udvendige rude afgives til det fri, mens 20% afgives til rummet. For den indvendige rude finder man, at 37% afgives til det fri, mens 63% afgives til rummet. Ved hjælp af de beregnede værdier for absorptionen i den indvendige og udvendige rude (fig. 15) beregnes derefter størrelsen af den sekundære transmitterede stråling. På fig. 16 er afbildet den totale transmitterede direkte stråling gennem termoruden. For den diffuse stråling finder man på tilsvarende måde, at den totale transmission er 69% af den indfaldende diffuse stråling, under forudsætning af at den er ensartet fordelt over halvrummet.



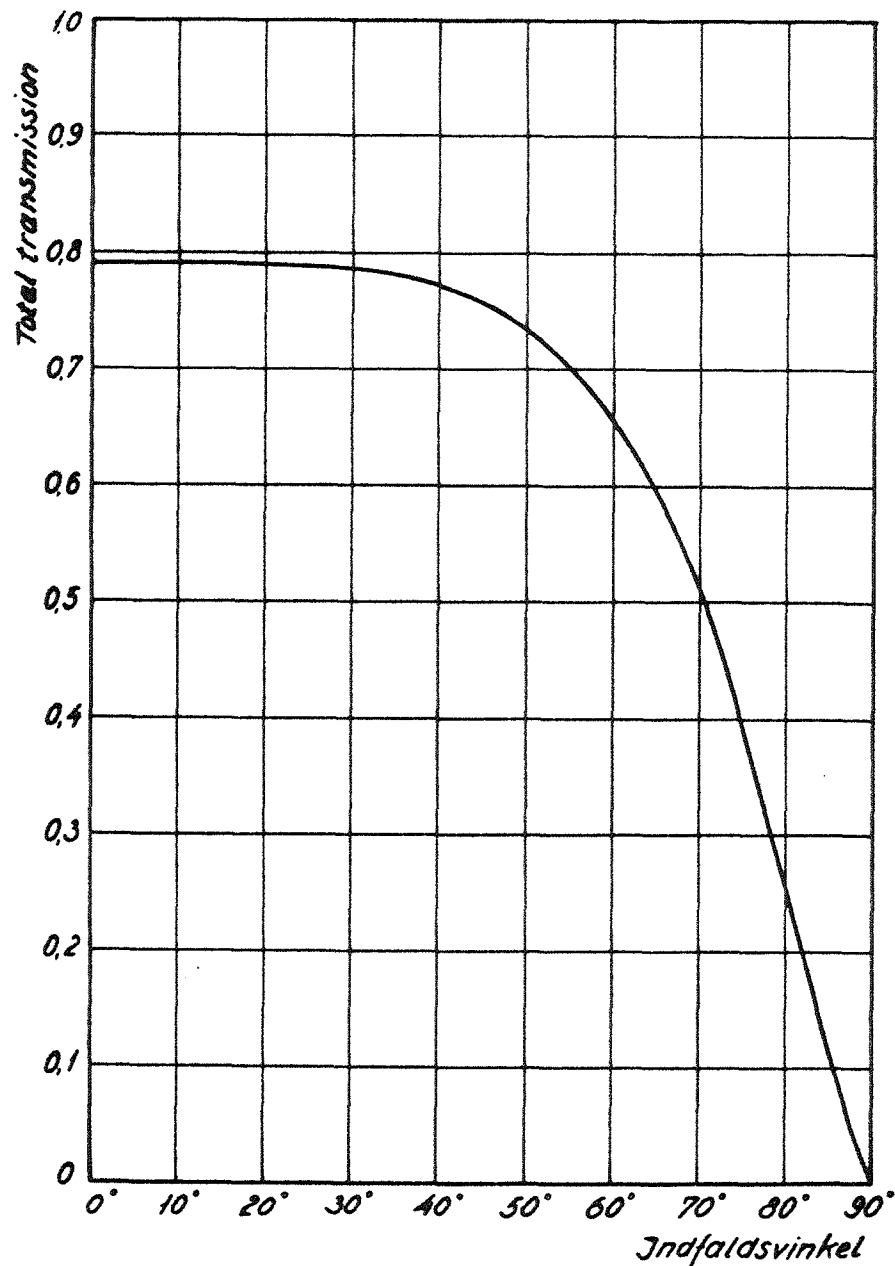


Fig. 16. Totaltransmissionen af den direkte solstråling gennem en dobbelt rude af alm. glas som funktion af indfaldsvinklen.

Total transmission of solar radiation by a double pane of common glass as a function of angle of incidence.

#### 4. AFSKÆRMNINGSMETODER

Da den moderne arkitektur har udviklet sig således, at store dele af facaderne er glasarealer, er det blevet nødvendigt at kontrollere og nedsætte solindfaldet gennem disse. Man er ofte interesseret i at få så lidt varme og så meget lys som muligt ind i rummet. Hvis man skal have en passende belysning, kan man imidlertid ikke undgå at få tilført nogen varme, idet al den synlige stråling absorberes af vægge, loft, gulv og inventar, hvorefter den afgives ved konvektion og mørk varmestråling.

##### 4.1 Absorberende og reflekterende ruder

Lidt under halvdelen af solstrålingen ligger i det synlige område, men både den synlige og infrarøde stråling transmitteres gennem alm. vinduesglas. Glassets absorption af den infrarøde stråling kan imidlertid forøges ved tilsætning af jernilte ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) fig. 13. Da absorptionen i det synlige område er størst ved de større bølgelængder, får glasset et blågrønt udseende. Den absorberede stråling afgives igen til omgivelserne ved konvektion og langbølget stråling. Effektiviteten af denne form for afskærmning er derfor afhængig af, hvor meget af denne varme der afgives fra den indvendige side af ruden til rummet.

En anden metode er at påføre glasset en spejlende belægning. Denne påføres indersiden af den udvendige rude i en termorude. Spejlbelægningen forøger refleksionen af den indfaldende stråling samtidig med, at der sker en kraftig absorption i det yderste lag glas med belægningen. Spektralfordelingen af den transmitterede stråling er meget afhængig af belægningens art, idet størrelsen af den transmitterede synlige stråling varierer meget.

På laboratoriet er der foretaget nogle målinger på ruder med en guldbelægning og en sølvgrå belægning. Ved disse målinger fandt man, at forholdet mellem den transmitterede synlige stråling og den totale transmitterede stråling var betydelig større for guldruden end for sølvruden.

I U.S.A [7] anvender man en ny type ruder med en belægning (Keramisk Coated), der har den egenskab, at den transmitterer den kortbølgede stråling samtidig med, at overfladens emissionsforhold er lille, således at udsendelsen af langbølget stråling formindskes. Samtidig har man en anden belægning, som reflekterer den kortbølgede stråling, mens emissionsforholdet er det samme som for en alm. rude. Den førstnævnte belægning anvendes på rudens indvendige side, mens den sidstnævnte sidder udvendigt.

En stor ulempe ved de reflekterende og absorberende ruder er, at de også nedsætter den transmitterede stråling på dage, hvor himlen er overskyet.

#### 4.2 Indvendig afskærmning

Den mest almindelige form for afskærmning er anvendelsen af gardiner, persiennner eller rullegardiner bag ruden. En del af strålingen, som transmitteres gennem glasset, reflekteres eller absorberes af afskærmningen, og idet størstedelen af den absorberede stråling tilføres rummet ved konvektion og langbølget stråling, er afskærmningens effektivitet i høj grad afhængig af, hvor stor en del af den indfaldne stråling der reflekteres.

Ved at anbringe afskærmningen mellem to lag glas og evt. ventilere mellemrummet kan man formindske den brøkdel af den absorberede varme, som afgives til rummet.

#### 4.3 Udvendig afskærmning

Den mest effektive afskærmning får man naturligvis, når denne anbringes uden for glasset, idet størstedelen af den absorberede varme da afgives til det fri.

Man skelner mellem bevægelige og faste afskærmninger. De mest almindelige typer på udvendige bevægelige afskærmninger er markiser, persiennner og jalousier, som findes i mange forskellige former. Da de bevægelige dele ofte er udsat for vind og vejr, kan de være dyre i vedligeholdelse. De faste udvendige afskærmninger findes ligeledes i mange forskellige former og indgår tit som en del af bygningens konstruktion i form af tagudhæng, balkoner, læmure, søjler o.s.v. Muligheden for anvendelse af faste afskærmninger er ofte bestemt af facadens orientering.

### 5. AFSKÆRMNINGSFAKTOREN

Når man skal beregne solindfaldet gennem et afskærmet vindue, må man kende effektiviteten af afskærmningen. Det forudsættes, at strålingsintensiteten  $H^S$ , som rammer vinduet, er en kendt størrelse. Den stråling, som transmitteres gennem det afskærmede vindue, vil ved stationær tilstand tilnærmelsesvis være proportional med den stråling, som rammer vinduet. Hvis  $H^A$  er den totale transmitterede solvarme, kan således

$$H^A = k \cdot H^S$$

Udtrykket er eksakt for den primære transmitterede stråling, men ikke for den sekundære, idet modstandstallene for afgivelse af konvektion og langbølget stråling er en funktion af overfladetemperaturen. Faktoren  $k$  vil dels variere med strålingens indfaldsvinkel og dels med forholdet mellem den direkte og diffuse stråling.

Størrelsen af den stråling, som transmitteres gennem en glasflade, er næsten uafhængig af indfaldsvinklen, når denne ligger mellem  $0^\circ$  og  $40^\circ$ , mens den varierer meget, når den ligger mellem  $40^\circ$  og  $90^\circ$ . Da en stor del af afskærmningerne udgøres af eller sidder bag en glasflade, vil det derfor være mere hensigtsmæssigt at sammenligne strålingen, som transmitteres gennem et afskærmet vindue, med den stråling, som transmitteres gennem et uafskærmet. Da vinduerne her til lands ofte har to lag glas (jvnf. bygningsreglement for købstæderne og landet, 1961. 8.4) er det naturligt at benytte en dobbelt-rude som sammenligningsgrundlag.

#### 5.1 Definition på afskærmningsfaktoren

Man kan nu definere afskærmningsfaktoren  $F$  ved ligningen

$$F = \frac{H^A}{H^U}, \quad (5.1.1)$$

hvor  $H^A$  er den totale transmitterede solstråling (primær og sekundær) gennem det afskærmede vindue, og  $H^U$  er den totale transmitterede solstråling gennem en dobbelt-rude. (2 stk. 4 mm alm. glas med 12 mm afstand).

Fordelingen af den direkte og diffuse stråling kan i særlige tilfælde have stor indflydelse på afskærmningsfaktoren. I disse tilfælde kan man dele afskærmningsfaktoren i to dele, nemlig en for den direkte stråling  $F_D$  og en for den diffuse stråling  $F_d$ . Vi har således

$$F_D = \frac{H_D^A}{H_D^U} \quad F_d = \frac{H_d^A}{H_d^U} \quad (5.1.2)$$

hvor  $H_D^A$ ,  $H_d^A$  og  $H_D^U$ ,  $H_d^U$  er henholdsvis den totale transmitterede direkte (D) eller diffuse (d) solstråling gennem det afskærmede vindue og den totale transmitterede direkte eller diffuse solstråling gennem det uafskærmede vindue.

Den transmitterede sekundære solstråling vil være en funktion af vindhastigheden, idet den transmitterede varme vil stige med aftagende vindhastighed.

## 5.2 Andre definitioner på afskærmningsfaktoren

I U.S.A benyttede man før 1963 en afskærmningsfaktor (shade factor), som havde følgende udseende

$$f = \frac{H^A - H_{sek}^E}{H_{prim}^E},$$

hvor  $H^A$  er den totale transmitterede solstråling gennem det afskærmede vindue, og  $H_{prim}^E$  og  $H_{sek}^E$  er henholdsvis den transmitterede primære og sekundære solstråling gennem en enkelt rude. Dette udtryk for en afskærmningsfaktor skal ses i relation til den måde, hvorpå man beregnede den totale varmestrom gennem et vindue [8].

Da denne afskærmningsfaktor ikke var særlig hensigtsmæssig, indførtes i 1963 en ny faktor S (shading coefficient)

$$S = \frac{H^A}{H^{EU}},$$

hvor  $H^A$  er den totale transmitterede solstråling gennem det afskærmede vindue, og  $H^{EU}$  er den totale transmitterede solstråling gennem en uafskærmet enkelt rude (double-strenght sheet glass).

J.C. Borel, Frankrig, benytter en noget anden definition på afskærmningsfaktoren [9]. Forholdet mellem den totale transmitterede solstråling gennem det afskærmede vindue og et uafskærmet enkeltvindue defineres som den relative solfaktor  $S_r$  (facteur solaire relatif).

Idet forholdet mellem den stråling, som transmitteres gennem det uafskærmede vindue, og den solstråling, som rammer vinduet, er 0,86, defineres solfaktoren (facteur solaire) som

$$S = 0,86 \cdot S_r$$

Borel angiver i tabeller forskellige afskærmningers effektivitet ved hjælp af denne faktor S.

Da faktoren 0,86 kun gælder for indfaldsvinkler mellem  $0^\circ$  og  $40^\circ$  og hurtigt aftager mod 0, når indfaldsvinklen går mod  $90^\circ$ , er S således ikke hensigtsmæssig til praktisk brug.

I den amerikanske litteratur opererer man også med en lignende faktor K som mål for afskærmningens effektivitet. "The solar heat transfer factor" K er defineret som forholdet mellem den totale varme, som transmitteres gennem det afskærmede vindue og solstrålingen, som rammer vinduet.

## 6. MÅLING AF SOLINDFALDET GENNEM ET VINDUE

Ved solindfaldet gennem en vindueskonstruktion, afskærmet eller uafskærmet skal forstås den totale varmemængde, som tilføres rummet gennem vinduet alene på grund af solstrålingen. En varmestøm gennem ruden, forårsaget af en temperaturforskel mellem rummet og det fri, skal således holdes udenfor. Ved målingerne, der er foretaget her, indgår varmestømmen gennem vinduesrammen heller ikke i måleresultaterne, idet der kun måles på selve glasarealet.

Solindfaldet kan som tidligere nævnt opdeles i en primær og en sekundær varmestøm. Den førstnævnte kan måles ved hjælp af et solarimeter, mens den sekundære i nogle tilfælde kan beregnes, når overflade- og lufttemperaturer er kendte størrelser.

En anden metode til bestemmelse af solindfaldet er beskrevet i [10]. Her måles den kortbølgede og langbølgede stråling ved hjælp af en kalorimeterplade, mens konvektionsbidraget beregnes ud fra de målte overflade- og lufttemperaturer.

Når man har en indvendig afskærmning, kan ovennævnte målemetoder imidlertid ikke anvendes, idet beregningen af den sekundære transmitterede solvarme bliver meget usikker. I dette tilfælde må man derfor måle den totale varme, som tilføres rummet bag glasruden. Dette gøres ved hjælp af et solkalorimeter som beskrevet i det følgende.

### 6.1 Solkalorimetret

Da det ikke alene er den absolutte størrelse af den transmitterede solvarme gennem et afskærmet vindue, men også afskærmningsfaktoren, man er interesseret i, er solkalorimetret konstrueret med dette for øje.

For at kunne bestemme afskærmningsfaktoren  $F$  for en given vindueskonstruktion skal man måle den totale transmitterede solstråling for både det afskærmede vindue og den uafskærmede termorude. Da vejrforholdene og solstrålingen kan være meget varierende på de enkelte mæledage, vil det derfor være en fordel, hvis de to målinger kan foretages samtidig under samme forhold.

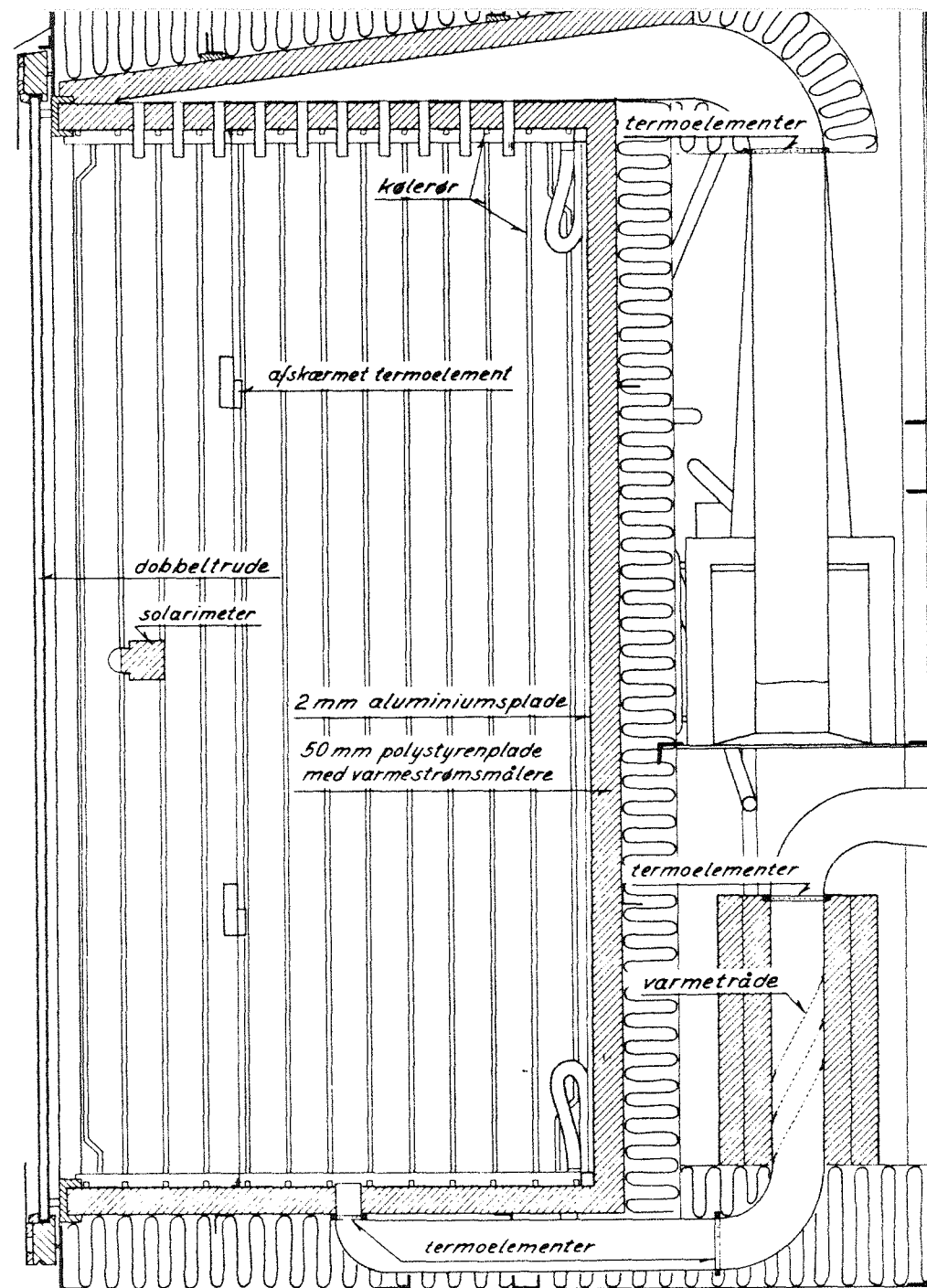


Fig. 17. Lodret snit i en kalorimetercelle.  
Vertical cut in a calorimeter cell.

Solkalorimetret har to ens celler, der er 2 m høje, 1 m brede og 1 m dybe. Cellernes ene side udgøres af vindueskonstruktionen, mens de øvrige sider er sortmalede aluminiumsplader, som absorberer den transmitterede solstråling. (Pladernes absorptionskoefficient over for den kortbølgede stråling er ved hjælp af solarimetrene målt til 0,97.) De er forsynet med et net af kølerør, således at den tilførte varme kan fjernes ved, at man lader vand cirkulere gennem disse.

Ved forsøg med indvendige afskærmninger, hvor konvektionsbidraget bliver betydeligt, kan denne varme fjernes ved ventilation af cellen, idet luften blæses ind gennem dyser i loftet og fjernes gennem en åbning i gulvet.

I kalorimetercellerne holdes et temperaturniveau, der svarer til uderstemperaturen, hvorved varmevekslingen med omgivelserne bliver mindst mulig.

## 6.2 Kalorimetrets konstruktion

Fig. 17 viser et lodret snit i en kalorimetercelle. Kølerørene er firkantede messingrør, der er limet på 2 mm tykke aluminiumsplader med en centerafstand på 77 mm. Kølerørene er parallelforbundne på hver væg, ligesom de tre sideflader er parallelforbundne.

Hele cellen er isoleret med 50 mm tykke polystyrenplader, hvori der er indsyet termoelementkæder, således at pladerne fungerer som varmestørmålere. Fig. 18 viser termokæden i en sidevæg. Isoleringspladerne fastklemmes til cellen ved hjælp af handy-profiler, der samtidig fungerer som beslag til fastgørelse af denne, således at man undgår kuldebroer mellem aluminiumspladerne og jernstativet. Både aluminiums- og polystyrenpladerne er samlet med lufttætte samlinger. Fig. 19 viser de to celler ophængt i kalorimeterkassen.

Cellerne er yderligere isoleret med 100 mm mineraluld i hulrummet mellem disse og kalorimeterkassen.

Vindueskonstruktionerne er fastgjort til kalorimeterkassen med hængsler ligesom en dør, således at cellerne er let tilgængelige, og en vindueskonstruktion let kan udskiftes med en anden.

Ruderne har målene 1126 x 2126 mm. Foran disse er der monteret en hvidmalet blænde med en åbning, der har målene 944 x 1906 mm, således at størrelsen af glasarealet, som rammes af solstrålingen, er

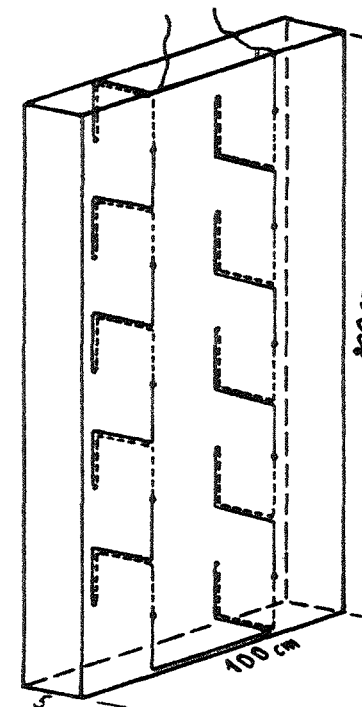


Fig. 18. Varmestørmåler i form af en termoelementkæde i isoleringen.  
Heat flow-meter as a termopile in the insulation.

konstant ved alle de indfaldsvinkler, ved hvilke der måles. Blenden er sortmalet på fladen, der vender mod glasset, for at undgå refleksioner mellem blende, rude og afskærmning. Forkanten af cellen er forsynet med en trækant, hvorpå der sidder en tætningsliste af skumgummi. Ved hjælp af 12 koblingsskruer klemmes glasset mod tætningslisten, således at der fremkommer en lufttæt lukning.

Bag hver rudes midtpunkt er der fastgjort et solarimeter i en afstand af 12 cm med målefladen parallel med ruden.

Indblæsningen af ventilationsluften sker i loftet gennem 100 dyser med  $d = 20$  mm og fjernes gennem en 50 x 300 mm spalte i bunden. Ventilationsluften til kalorimetercellen med afskærmningen kan endvidere inden udblæsningen afkøles ved passage af en køleflade.

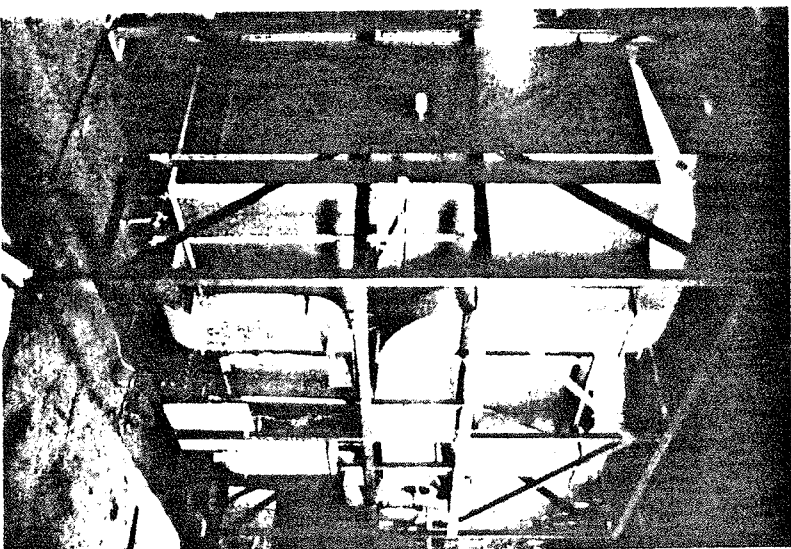


Fig. 19. De to kalorimeterceller ses installeret i kalorimeterkassen, inden den isoleres og lukkes.  
The two calorimeter cells are seen installed in the calorimeterbox before it is insulated and closed.

De to celler sidder side om side i en kasse, der kan drejes  $90^\circ$  om en vandret akse. I rummen, hvori kalorimeterkassen er ophængt, er fastgjort til en platform, der kan dreje  $360^\circ$  om en lodret akse. På denne platform står endvidere et hus, som indeholder pumpe, kølemaskine, kontrollavler og instrumenter (fig. 20). Kalorimeterkassen bevæges ved hjælp af de to håndjul på maskinhuset. Ved hjælp af et stig (fig. 21) med en skala kan man indstille en ønsket udfaldsvinkel mellem vinduet og solstrålerne.

Solkalorimetret står på en mark uden for laboratoriet for Varmeforsøg i Højtorkevej nord for København. Dets placering i forhold til omgivelserne er vist på fig. 22.

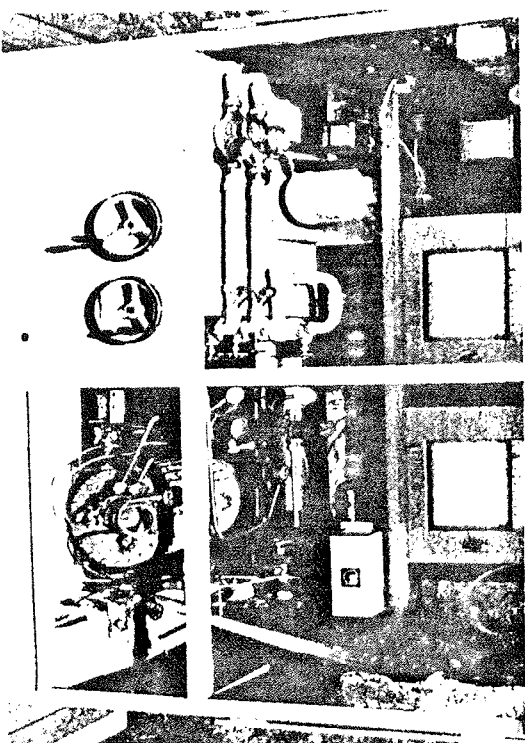


Fig. 20. Maskinhus med kølemaskine og måleinstrumenter.  
Engine-house with refrigeration apparatus and measuring equipment.

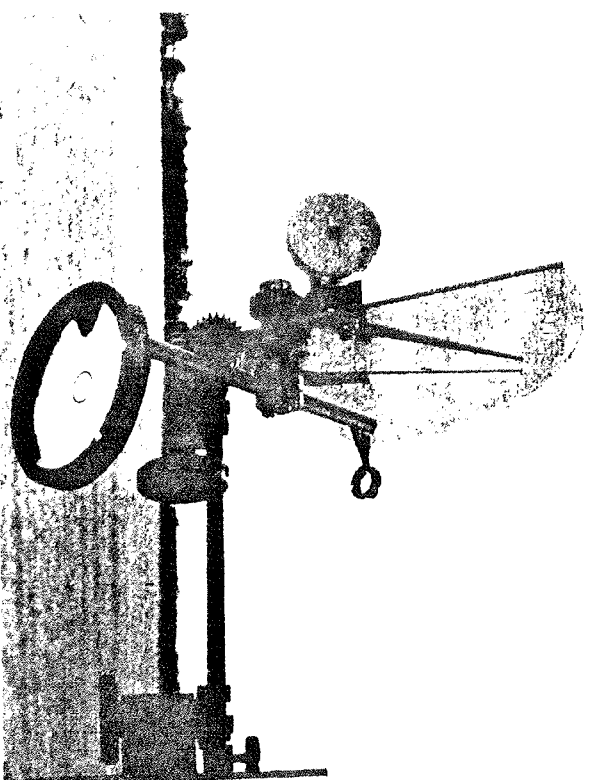


Fig. 21. Stige på solkalorimeter.  
Solar-calorimeter-sight.

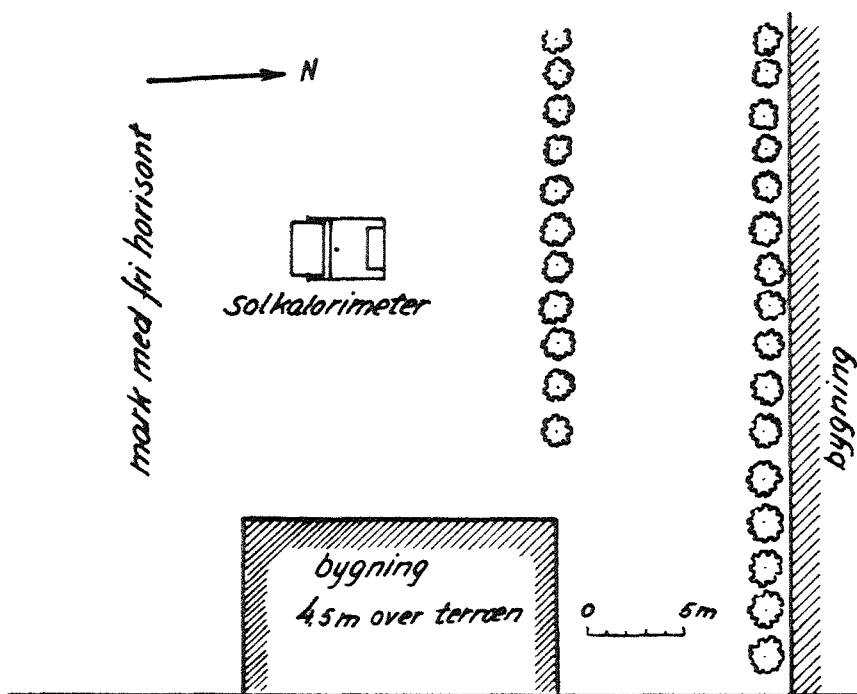


Fig. 22. Beliggenhed af solkalorimetret.  
Position of the solar-calorimeter.

### 6.3 Vandcirkulationen

På fig. 23 er vist en principskitse af vandcirkulationen og kølingen af denne.

Kølevandet pumpes fra vandreservoiret over gennem kalorimetret og tilbage til reservoiret gennem en freonkølet varmeveksler. Freon-tilførslen til varmeveksleren reguleres af to magnetventiler på henholdsvis tryk- og sugesiden og styres af et kontakttermometer, hvis føler sidder i vandstrømmen på varmevekslerens afgangsside. Temperaturen på dette vand svinger ca.  $2^{\circ}\text{C}$ , men da frekvensen er ca. 8 sek., vil disse svingninger blive udlignet i reservoiret, der indeholder 300 l, således at temperaturen i dette bliver konstant og næsten er uafhængig af belastningen. Ved målinger med konstant belastning var temperaturen på tilgangsvandet til kalorimetercellerne så stabil, at svingningerne ikke kunne registreres ( $< 0,01^{\circ}\text{C}$ ).

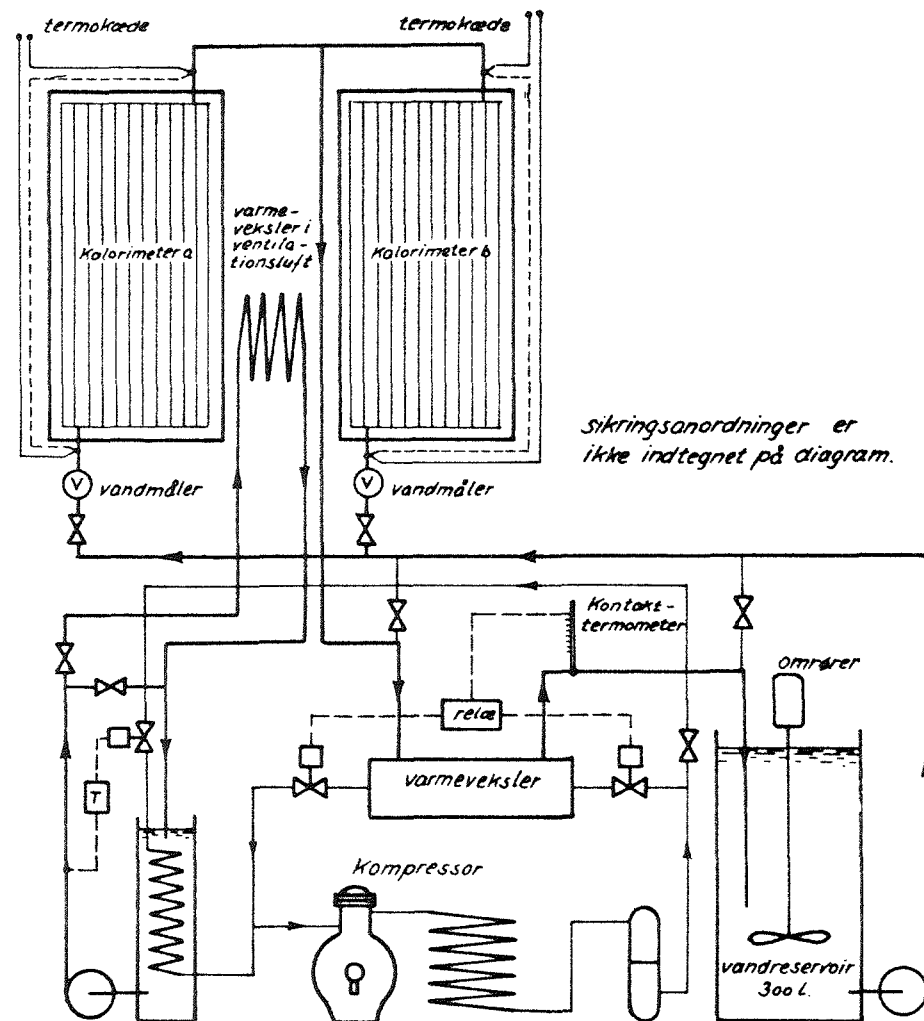


Fig. 23. Principskitse af vandcirkulationen.  
Simplified diagram of the water-circulation.

Kølefladen i ventilationssystemet får tilført vand fra et mindre reservoir, der ligeledes køles.

Automatik til sikring af anlægget er ikke vist på tegningen.

Vandets temperaturstigning ved passage af kalorimetercellen måles ved hjælp af en termoelementkæde på 20 elementer, som er anbragt i

vandstrømmen umiddelbart før indløbet og efter udløbet af cellen. For at undgå varmeafledning fra loddestederne løber termoelementledningen 40 cm i vandstrømmen, inden den føres ud af denne.

Den cirkulerende vandmængde måles ved hjælp af to justerede vandmålere (ringstempelmålere).

#### 6.4 Ventilationssystemet

Varmemængden, som fjernes af ventilationsluften, bestemmes ved en effekt- og temperaturmåling. Med en termoelementkæde måles temperaturstigningen af ventilationsluften ved dennes passage af kalorimetercellen. Derefter måles dens temperaturstigning, når den passerer et varmelegeme, hvis afgivne effekt samtidig måles. Den søgte varmemængde fås da ved alm. forholdsregning.

Varmelegemet sidder i udblæsningskanalen, som vist på fig. 17, og er lavet af 0,1 mm Konstantantråde, der er forbundet parallelt, således at det får en passende modstand. For at få en ensartet opvarmning af ventilationsluften, er varmetråden fordelt over hele kanaltværsnittet. Hver kanal er forsynet med tre varmelegemer, der kan parallel- eller serieforbindes, således at den afgivne effekt kan afpasses efter ventilationens størrelse. Strømforsyningen til varmetrådene er stabiliseret, og spændingen er på 24 V. Spændingsfaldet over varmetrådene måles ved hjælp af et Siemens præcisionsvoltmeter. Idet modstandene i varmelegemerne er kendte størrelser, kan den afgivne effekt beregnes.

Kanalstykket med varmelegemerne er isoleret med polystyrenplader, hvori der er indsyet en termoelementkæde til bestemmelse af et evt. varmetab.

Termoelementkæden i luftstrømmen består af 10 elementer, der er fordelt over hele tværsnittet.

#### 6.5 Måling af termospændinger

Temperaturmålingerne sker ved hjælp af termoelementer, hvis kolde loddested, der er godt isoleret, er anbragt midt i kalorimeterkassen. Det kolde loddesteds temperatur måles ved hjælp af to serieforbundne termoelementer i forhold til temperaturen i en tilgængelig termoflaskes i maskinhuset.

Glasoverfladens indvendige og udvendige temperaturer måles med fire termoelementer i serie, idet to af elementerne er anbragt ved siden af hinanden i de to øverste fjerdedelspunkter, mens de to andre elementer er anbragt i de nederste fjerdedelspunkter. Termoelementerne er limet på glasset med araldit.

Den indvendige lufttemperatur registreres ligeledes i de øvre og nedre fjerdedelspunkter med fire termoelementer i en afstand af 35 cm fra ruden. Termoelementerne er strålingsbeskyttet med to kapper af aluminiumsfolie. For både glas og luft kan man foruden middeltemperaturen i de fire punkter også måle temperaturen i øverste og nederste halvdel hver for sig.

Med to termoelementer måles desuden den indvendige og udvendige glastemperatur bag blenden, samt blendens og trækantens temperatur.

I kalorimetercellen måles de fem fladers temperaturer hver for sig ligeledes med fire termoelementer i serie. Termoelementerne er limet på aluminiumspladerne (elektrisk isoleret) i fjerdedelspunktet for afstanden mellem kølerørerne. Termokædernes indre modstand er gjort lige store, således at man dels kan måle termospændingen i de enkelte kæder og dels kan måle fladernes middeltemperatur ved at parallelforbinde kæderne ved hjælp af en omskifter.

Varmestromsmålerne, der er indsyet i de fem fladers isolering, har ligeledes samme indre modstand, således at man dels kan måle termospændingen i de enkelte kæder og dels måle middelspændingen, når de er parallelforbundet.

Da termospændingen fra solarimetrene varierer inden for et stort interval, indskydes der en spændingsdelers i kredsløbet, således at følsomheden kan nedsættes til 1/2 eller 1/6 ved hjælp af en omskifter.

Samtlige ledninger samles i et panel i bunden af kalorimeterkassen og føres over i maskinhuset gennem fire multikabler, hvor de igen fordeles til multistik, som vist på fig. 24.

Registreringen af termospændingerne sker ved hjælp af to Philips 12-punktsskrivere (Kompensationsskrivere). Den ene skriver registrerer opvarmningen af den cirkulerende vandmængde, opvarmningen af ventilationsluften og solarimetrenes termospænding, d.v.s. de størrelser, der skal integreres i måleintervallet, den anden skriver registrerer de forskellige temperaturer og varmestromsmålernes termo-



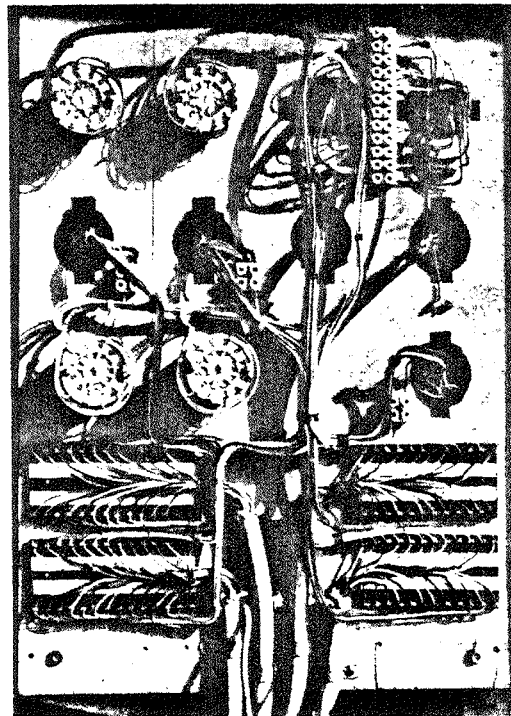
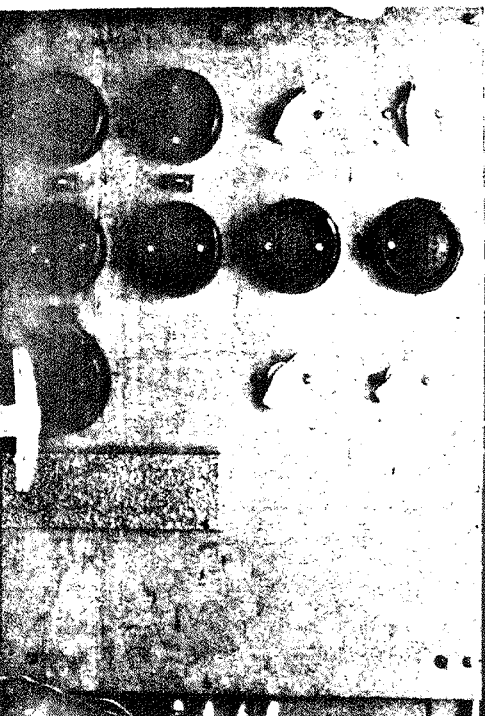


Fig. 24. Foto af panel med multistik og omskiftere.  
Photo of wainscot with multiple plugs and change-over switches.

spændinger. De to kalorimetercellers middeltemperaturer og termosspændinger måles på eet multistik, mens de enkelte termoelementkæders spændinger kan måles på de resterende multistik.

Den udvendige lufttemperatur måles dels med et strålingsbeskyttet termoelement, der sidder i skyggen bag maskinhuset, og dels med et aspirationspsykrometer midt ud for ruderne. Samtidig bestemmes luftens indhold af vanddamp ved jordoverfladen.

Vindhastigheden bestemmes ligeledes foran ruderne ved hjælp af et vingehjulsanemometer. Anemometret trækker et tællerværk, som aflæses med mellemrum.

## 6.6 Kalorimetrets varmebalance

Den varmemængde  $Q_{total}$ , som tilføres kalorimetret gennem vinduet alene på grund af solen, bestemmes af følgende udtryk:

$$Q_{total} = Q_V + Q_{tab} + Q_b + Q_t, \quad [\text{kcal/h}]$$

hvor

$Q_V$  er den varmemængde, som fjernes af den cirkulerende vandmængde,

$Q_{tab}$  er den varmemængde, som transmitteres ud gennem væg og rand,

$Q_b$  er den varmemængde, som bliver bundet i kalorimetret og ruderne, når deres temperaturer ændres,

$Q_t$  er transmissionstabet gennem vinduet.

### 6.6.1 Varme fjernet af kølevandet

Den varme, som fjernes af den cirkulerende vandmængde, er bestemt af

$$Q_V = V \cdot \gamma \cdot c \cdot \alpha \cdot \frac{u_m}{20}, \quad [\text{kcal/h}]$$

|      |  |   |
|------|--|---|
| hvor | $V$ er vandmængden,                                    | $(\text{m}^3/\text{h})$                   |
|      | $\gamma$ er vægtfyllden af vandet,                     | $(\text{kg}/\text{m}^3)$                  |
|      | $c$ er specifik varmekapacitet for vand,               | $(\text{kcal}/\text{kg } ^\circ\text{C})$ |
|      | $\alpha$ er termoelementtrådens karakteristikhældning, | $(^\circ\text{C}/\text{mV})$              |
|      | $u_m$ er termoelementkædens middelspænding.            | $(\text{mV})$                             |

Denne ligning gælder for stationære forhold.

Hvis der f.eks. sker en stigning  $\Delta\theta$  i vandets tilgangstemperatur, vil temperaturforskellen mellem termoelementerne ved ind- og udløb blive formindsket, indtil vandet er nået helt igennem kalorimetret. Temperaturstigningen i tilgangsvandet bevirker altså, at  $Q_V$  formindskes med størrelsen  $\Delta\theta \cdot L$ , hvor  $L$  er kalorimetrets vandindhold.

Hvis tilgangstemperaturen svinger, vil de svingninger, som ikke når at passere kalorimetret helt i måleintervallet, på tilsvarende måde give en fejl på  $Q_V$ . Kalorimetercellens vandindhold er på 7 l. Med en vandcirkulation på 10 l/min og en måleperiode på 20 minutter er det kun få procent af den cirkulerende vandmængde, som ikke når at passere kalorimetret helt. Da svingningerne på tilgangstemperaturen, som tidligere beskrevet, samtidig er meget små, er fejlen uden betydning.

I de tilfælde, hvor man har en lille vandcirkulation og store svingninger i den indfaldende strålingsintensitet, må man tage hensyn til forsinkelsen i registreringen af den tilførte varme, især hvis denne sammenlignes med solarimetrenes visning, idet der praktisk talt ikke er nogen forsinkelse på disse.

#### 6.6.2 Varmetab gennem væggene og randen

Varmetabet gennem væggene måles med termoelementkæderne, der er indsyet i polystyrenpladerne, og bestemmes ved ligningen

$$Q_{VSM} = \frac{\lambda}{e} \cdot \Delta\theta \cdot A = \frac{\lambda}{e} \cdot \frac{u}{10} \cdot i \cdot A,$$

hvor  $\lambda$  er varmeledningstallet for polystyrenpladen, (kcal/mh<sup>0</sup>C)  
 $e$  er tykkelsen af pladen, (m)  
 $u$  er den målte termospenning for de 10 elementer i serie, (mV)  
 $i$  er termotrådens karakteristikhældning, (°C/mV)  
 $A$  er arealet af cellens flader. (m<sup>2</sup>)

Ligningen gælder for en stationær eendimensional varmem strøm. På fig. 25 er tegnet varmem strømmen fra luft til en 5 cm polystyrenplade, som funktion af tiden, hvis man til tiden  $t = 0$  momentant hæver temperaturen  $\Delta\theta$  °C på den ene side af pladen. Der er endvidere tegnet den varmem strøm, termoelementkæden vil registrere. (Kurverne er tegnet ved hjælp af laboratoriets analogiregnekmaskine).

På grund af polystyrenpladens lille vandværdi vil tilstanden, ved en ændring af temperaturdifferensen over pladen, hurtigt nærme sig den stationære.

Da ændringerne i varmetabet i måleperioderne er meget små, er fejlen, man begår ved at regne varmem strømmen for stationær, uden betydning. Da varmetabet tillige ikke er ret stort, er den fejl, man begår ved at regne det som eendimensionalt over hele fladen, uden betydning.

Tab gennem randen.

Tabet gennem polystyrenvæggen og randen beregnes som to eendimensionale varmem strømme. Ved kanten, hvor væg og glas mødes, har vi et randtab, som ikke umiddelbart lader sig måle eller beregne.

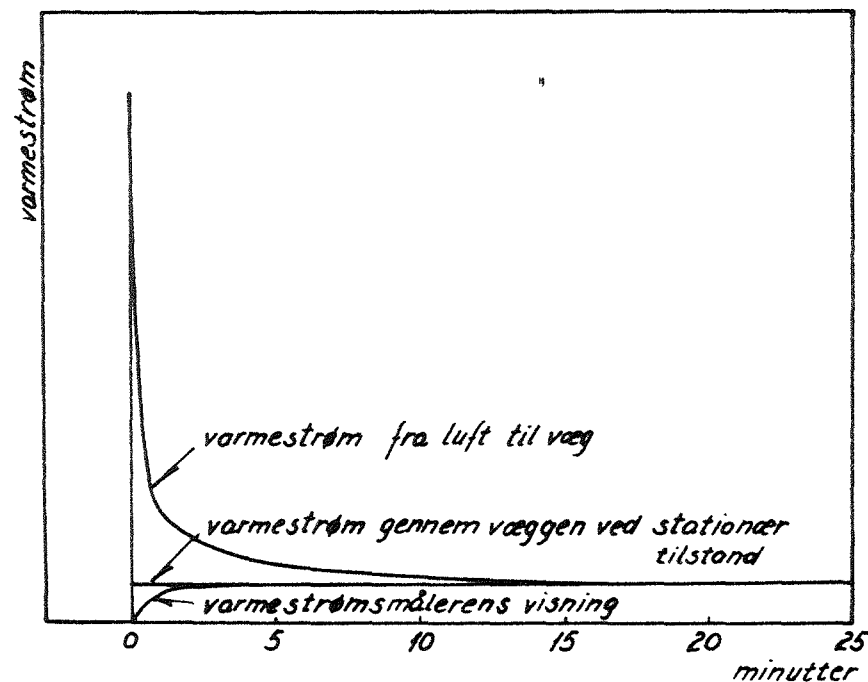


Fig. 25. Varmestrøm gennem 5 cm tyk polystyrenplade.  
Heatflow through 5 cm thick polystyren-plate.

Dette randtab bestemmes ved hjælp af laboratoriets el-model til beregning af flerdimensionale varmem strømme [11].

På modellen måler vi dels de to eendimensionale varmem strømme og dels den totale varmem strøm gennem væg, rand og glas. Ved at trække de to eendimensionale fra den totale varmem strøm fås tabet gennem randen.

På den måde fandt man, at tabet gennem randen var 0,6 kcal/h for hver 1 °C forskel mellem det indvendige og udvendige temperaturniveau.

På analog måde fandt man, at tabet gennem randen var 0,7 kcal/h for hver 1 °C forskel mellem det indvendige og udvendige temperaturniveau i det tilfælde (kontrolmålingerne), hvor åbningen bag glasset er dækket af en 5 cm polystyrenplade.

Ved kontrolmålingerne, hvor temperaturforskellen mellem rummet og det fri er stor, og hvor de registrerede varmemængder er små, har dette randtab stor indflydelse på resultatet.

### 6.6.3 Kalorimetrets varmekapacitet

Andres temperaturniveauet i kalorimetret i et måleinterval, vil dette forårsage, at der bindes eller frigives en varmemængde af materialerne. Denne varmemængde er bestemt af materialernes vandværdi  $V$  og deres temperaturændring  $\Delta\vartheta$ , idet der bindes eller frigives varmemængden  $Q_b = \Delta\vartheta \cdot V$ . Ved beregningen af kalorimetrets varmekapacitet opdeles denne i 3 bidrag, nemlig kalorimetercellen, vandindholdet og vinduet. Vandværdien af kalorimetercellens vægge med kølerør er beregnet til 13,5 kcal/°C, mens vandindholdet og vinduet har en vandværdi på henholdsvis 7 kcal/°C og 9 kcal/°C.

### 6.6.4 Varmetab gennem ruden

Når de forskellige målinger skal sammenlignes, må dette ske på samme grundlag. Ved definitionen på afskærmningsfaktoren er det forudsat, at den varme, som transmitteres gennem ruden, udelukkende skyldes solstrålingen. Da det under forsøgene ikke er muligt at holde ens indvendige og udvendige temperaturforhold, vil der samtidig ske en varmeveksling mellem rummet og det fri gennem glasset.

Tabet gennem ruden kan deles i to bidrag, nemlig tabet gennem glasset, som ikke dækkes af blenden, og tabet gennem glasset, som dækkes af blenden.

Til beregning af tabet gennem den solbeskinnede del af ruden kan man ikke benytte glasfladernes overfladetemperaturer, idet en del af solstrålingen absorberes i glasset og opvarmer dette. I stedet for benyttes den indvendige og udvendige retningstemperatur  $\vartheta_{R,i}$  og  $\vartheta_{R,u}$ , som beskrevet i appendix A, samt den resulterende modstand  $M_1$ .

Tabet gennem det areal  $A_1$  af ruden, som ikke dækkes af blenden, er da bestemt af

$$Q_{t,1} = \frac{\vartheta_{R,i} - \vartheta_{R,u}}{M_1} \cdot A_1$$

idet  $\vartheta_{R,i}$ ,  $\vartheta_{R,u}$  og  $M_1$  beregnes som angivet i appendix A.

Den del af glasset, som sidder i blendens skygge, hører ikke med til selve vinduet, når man betragter dette i forbindelse med solindfaldet. Ved beregningen af solindfaldet gennem vinduet skal resultatet derfor korrigeres for den varmestøm, der går gennem glasarealet bag blenden. Idet modstanden  $M_2$  fra den indvendige til den udvendige

side af ruden er kendt, og den indvendige og udvendige glastemperatur  $\vartheta_{g,i}$  og  $\vartheta_{g,u}$  bag blenden måles, bliver varmestømmen gennem glasset bestemt af

$$Q_{t,2} = \frac{\vartheta_{g,i} - \vartheta_{g,u}}{M_2} \cdot A_2$$

idet  $A_2$  er glasarealet bag blenden, som begrænses af tætningslisten.

Varmestømmen fra den del af ruden, som sidder i solen, til den del af ruden, som sidder bag blenden, er så lille, at den er uden betydning.

Vindueskonstruktionens modstandstal bestemmes ved målinger om natten. Varmetabet gennem termoruden måles ved hjælp af solkalorimetret. Når man samtidig måler temperaturfaldet over ruden, kan modstandstallet beregnes. For termoruden er dette fundet til 0,18 m<sup>2</sup>h°C/kcal ved 20 °C, hvilket er i overensstemmelse med de værdier, der er bestemt af laboratoriet ved andre undersøgelser.

Varmetabet gennem vinduet, når dette er forsynet med en solafskærmning, kan bestemmes på tilsvarende måde. Idet varmestømmen gennem det afskærmede vindue er ligefrem proportional med temperaturfaldet over ruden, er det imidlertid lettere at bestemme modstandstallet for det afskærmede vindue ved at måle temperaturfaldet over den uafskærmede og afskærmede termorude samtidig. Når termorudens modstandstal sættes til 0,18 m<sup>2</sup>h°C/kcal, kan modstandstallet for det afskærmede vindue bestemmes ved forholdsregning. Modstandstallet for et afskærmet vindue vil ofte være afhængig af konvektionsforholdene omkring afskærmningen, d.v.s. det kan variere en del. Da man ved målingerne om dagen tilstræber et transmissionstab, der er så lille som muligt, har denne usikkerhed ingen praktisk betydning.

### 6.6.5 Varme fjernet ved ventilation

Ved målingerne, hvor kalorimetercellen ventileres, bestemmes varmemængden, som fjernes af ventilationsluften, af ligningen

$$Q_{\text{luft}} = W \cdot \frac{\Delta\vartheta_1}{\Delta\vartheta_2} \quad [\text{kcal/h}]$$

idet  $\Delta\vartheta_1$  og  $\Delta\vartheta_2$  er opvarmningen af ventilationsluften, når denne passerer henholdsvis kalorimetercellen og varmetræden, og  $W$  er var-

memængden, som afgives af varmetråden.  $W$  måles i kcal/h og er bestemt af

$$W = U^2 \cdot R \cdot 0,86 ,$$

idet  $U$  og  $R$  er henholdsvis spændingsfald og modstand over varmetråden.

## 7. USIKKERHEDSOVERSLAG

Usikkerheden bestemmes dels på den varmemængde, som transmitteres gennem vinduet (den målte varmemængde) og dels på den korrigerede varmemængde, d.v.s. den varme, der ville blive transmitteret gennem vinduet, hvis der var samme temperatur inde og ude. Desuden bestemmes usikkerheden på afskærmningsfaktoren.

### 7.1 Ubestemtheden på den målte varmemængde

Den varmemængde  $Q_r$ , som tilføres kalorimetret gennem vinduet, bestemmes direkte af de målte størrelser, idet

$$Q_r = Q_v + Q_{tab} + Q_b \quad [\text{kcal/h}]$$

hvor  $Q_v$  er den varmemængde, som fjernes af den cirkulerende vandmængde,

$Q_{tab}$  er den varmemængde, som transmitteres ud gennem vægge og rand,

$Q_b$  er den varmemængde, som bliver bundet i kalorimetret og ruderne, når deres temperaturer ændres.

Idet der ikke er nogen indbyrdes afhængighed mellem størrelserne, kan ophobningsloven anvendes på udtrykket for  $Q_r$ .

$Q_r$ 's absolutte ubestemthed er da bestemt ved

$$s(Q_r) = \sqrt{(s(Q_v))^2 + (s(Q_{tab}))^2 + (s(Q_b))^2} \quad [\text{kcal/h}]$$

De enkelte led under rodtegnet behandles hver for sig.

$$Q_v = V \cdot \gamma \cdot c \cdot \frac{\alpha}{20} \cdot u_m \quad [\text{kcal/h}]$$

Den relative ubestemthed på  $Q_v$  er bestemt af

$$\frac{s(Q_v)}{Q_v} = \sqrt{\left(\frac{s(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{s(\alpha)}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{s(u_m)}{u_m}\right)^2}$$

I det temperaturinterval, hvori målingerne foregår, er den relative ubestemthed på vandets vægtfylde 0,1% og derfor uden betydning. Den

relative ubestemthed på vandmængden og termoelementledningens karakteristikhældning er henholdsvis

$$\frac{s(V)}{V} = 0,5\% \quad \text{og} \quad \frac{s(\alpha)}{\alpha} = 1\%$$

Ubestemtheden på termospendingen  $u_m$  er sammensat af ubestemtheden  $s(a)$  på aflæsningen og ubestemtheden  $s(b)$  på skriveren. ( $u_m$  aflæses på skrivestrimlen i enheden mm).

$$s(a) = 0,5 \text{ mm} \quad s(b) = 0,5\% \text{ af } 250 \text{ mm} = 1,2 \text{ mm}.$$

$$s(u_m) = \sqrt{(s(a))^2 + (s(b))^2} = \sqrt{0,5^2 + 1,2^2} = 1,3 \text{ mm}.$$

Vandmængden vælges som regel således, at  $a > 130 \text{ mm}$ . Vi har da

$$\frac{s(u_m)}{u_m} = \frac{1,3}{130} \cdot 100 = 1\%$$

$$\frac{s(Q_V)}{Q_V} = \sqrt{0,005^2 + 0,01^2 + 0,01^2} = 0,015 = 1,5\%$$

Den absolutte ubestemthed på  $Q_V$  bliver således 15 kcal, når  $Q_V = 1000 \text{ kcal}$  og 1,5 kcal, når  $Q_V = 100 \text{ kcal}$ .

$Q_{\text{tab}}$  er sammensat af varmetabet gennem siderne  $Q_{\text{VSM}}$ , som måles ved hjælp af varmestrømsmålere, og varmetabet gennem randen. ( $Q_{\text{tab}}$  kan være både positiv og negativ).

$$Q_{\text{VSM}} = \frac{\lambda}{e} \cdot A \cdot \Delta\theta$$

Den relative ubestemthed på arealet  $A$  og temperaturdifferencen  $\Delta\theta$  er ubetydelige i forhold til ubestemtheden på  $\lambda$  og  $e$ .

$$\frac{s(Q_{\text{VSM}})}{Q_{\text{VSM}}} = \sqrt{\left(\frac{s(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{s(e)}{e}\right)^2}$$

$$\lambda = 0,03 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \quad s(\lambda) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

$$e = 0,05 \text{ m} \quad s(e) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\frac{s(Q_{\text{VSM}})}{Q_{\text{VSM}}} = \sqrt{0,05^2 + 0,03^2} = 0,058 \approx 6\%$$

Ved målingerne tilstræbes samme indvendige og udvendige temperaturer, således at varmetabet bliver så lille som muligt. Det er som regel

mindre end 10 kcal/h. ( $Q_{\text{VSM}} = 10 \text{ kcal/h}$  svarer til en temperaturdifferens på ca.  $6^\circ\text{C}$ ). Ved et tab på 10 kcal/h får  $Q_{\text{VSM}}$  følgende standardafvigelse:

$$s(Q_{\text{VSM}}) = 10 \cdot 0,06 = 0,6 \text{ kcal/h}.$$

Ved nogle af kontrolmålingerne har vi undtagelsesvis en større temperaturforskel mellem kalorimetret og den udvendige luft. I disse tilfælde kan  $Q_{\text{VSM}}$  blive 20 kcal/h, og standardafvigelsen  $s(Q_{\text{VSM}})$  bliver tilsvarende større.

Til bestemmelse af randtabet er ved modelforsøg fundet følgende udtryk:

$$Q_{\text{rand}} = 0,6 \cdot \Delta\theta \quad [\text{kcal/h}],$$

hvor  $\Delta\theta$  er temperaturforskellen mellem kalorimeteroverfladen og den udvendige lufttemperatur. Den relative ubestemthed på  $Q_{\text{rand}}$  skønnes at være 10%. Ved en temperaturdifferens  $\Delta\theta$  på  $6^\circ\text{C}$ , svarende til  $Q_{\text{VSM}} = 10 \text{ kcal/h}$ , bliver  $Q_{\text{rand}} = 3,6 \text{ kcal/h}$  og den absolutte ubestemthed  $s(Q_{\text{rand}}) = 0,4 \text{ kcal/h}$ .

$$s(Q_{\text{tab}}) = \sqrt{(s(Q_{\text{VSM}}))^2 + (s(Q_{\text{rand}}))^2} = \sqrt{0,6^2 + 0,4^2} \approx 0,7 \text{ kcal/h}.$$

Ændringer i den bundne varme deles i tre bidrag, nemlig fra kalorimetercellen  $Q_1$ , vandindholdet  $Q_2$  og vindueskonstruktionen  $Q_3$ .

$$s(Q_b) = \sqrt{(s(Q_1))^2 + (s(Q_2))^2 + (s(Q_3))^2} \quad [\text{kcal/h}]$$

$$Q_1 = \Delta\theta_1 \cdot V_1 \quad [\text{kcal/h}]$$

hvor  $V_1$  er kalorimetercellens vandværdi. Denne er beregnet til 13,5 kcal/ $^\circ\text{C}$  med en skønnet ubestemthed på 0,5 kcal/ $^\circ\text{C}$ .

$$s(Q_1) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_1}{\partial V_1} s(V_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_1}{\partial \Delta\theta_1} s(\Delta\theta_1)\right)^2} \quad [\text{kcal/h}]$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial V_1} = \Delta\theta; \quad \frac{\partial Q_1}{\partial \Delta\theta} = V_1$$

$$\Delta\theta = 0,6^\circ\text{C/h} \quad s(\Delta\theta) = 0,05^\circ\text{C/h}$$

$$V_1 = 13,5 \text{ kcal}/^\circ\text{C} \quad s(V_1) = 0,5 \text{ kcal}/^\circ\text{C}$$

$$s(Q_1) = \sqrt{(0,6 \cdot 0,5)^2 + (13,5 \cdot 0,05)^2} \approx 0,7 \text{ kcal/h}$$

Analogt har vi  $Q_2 = \Delta\vartheta_2 \cdot V_2$  for kalorimetrets vandindhold. Som tidligere nævnt holdes temperaturen på den tilførte vandmængde konstant. Svingningerne i vandtemperaturen er ubetydelige. Undtagelsesvis får vi ved store ændringer i belastningen en ændring af fremløbstemperaturen af størrelsesordenen  $0,1^\circ\text{C/h}$ . Med vandværdien  $7 \text{ kcal/}^\circ\text{C}$  og  $s(\Delta\vartheta_2) = 0,01^\circ\text{C}$  bliver  $s(Q_2) = 0,1 \text{ kcal/h}$ .

For vindueskonstruktionen gælder

$$Q_3 = N \Delta\vartheta_3 \cdot V_3,$$

idet  $N$  er den brøkdel af varmen, som afgives fra kalorimetret til vindueskonstruktionen.

$$s(Q_3) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_3}{\partial N} s(N)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_3}{\partial \Delta\vartheta_3} s(\Delta\vartheta_3)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_3}{\partial V_3} s(V_3)\right)^2}$$

For termoruden finder vi følgende:

$$N = 0,40 \quad s(N) = 0,02$$

$$\Delta\vartheta_3 = 3,0^\circ\text{C/h} \quad s(\Delta\vartheta_3) = 0,1^\circ\text{C/h}$$

$$V_3 = 9,0 \text{ kcal/}^\circ\text{C} \quad s(V_3) = 0,5 \text{ kcal/}^\circ\text{C}$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial N} = \Delta\vartheta_3 \cdot V_3 = 3,0 \cdot 9,0 = 27,0 \text{ kcal/h}$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \Delta\vartheta_3} = N \cdot V_3 = 0,40 \cdot 9,0 = 3,6 \text{ kcal/}^\circ\text{C}$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial V_3} = N \Delta\vartheta_3 = 0,40 \cdot 3,0 = 1,2^\circ\text{C/h}$$

$$s(Q_3) = \sqrt{(27,0 \cdot 0,02)^2 + (3,6 \cdot 0,1)^2 + (1,2 \cdot 0,5)^2} \cong \sqrt{0,29 + 0,13 + 0,36} \cong 0,9 \text{ kcal/h}$$

Idet vi ser bort fra bidrag fra  $Q_2$ , finder vi

$$s(Q_b) = \sqrt{0,7^2 + 0,9^2} \cong 1,1 \text{ kcal/h}$$

Den søgte størrelse af  $s(Q_r)$  kan derefter bestemmes.

Når størrelsesordenen af  $Q_r$  er  $1000 \text{ kcal/h}$  fås

$$s(Q_r) = \sqrt{15^2 + 0,7^2 + 1,1^2} \cong 15 \text{ kcal/h}$$

og den relative ubestemthed  $\frac{s(Q_r)}{Q_r}$  bliver  $1,5\%$ .

Ubestemtheden på  $Q_r$  er i dette tilfælde udelukkende afhængig af ubestemtheden på den varmemængde, som fjernes af den cirkulerende vandmængde.

Når størrelsesordenen af  $Q_r$  er  $100 \text{ kcal/h}$  fås

$$s(Q_r) = \sqrt{1,5^2 + 0,7^2 + 1,1^2} \cong 2,0 \text{ kcal/h}$$

Den relative ubestemthed  $\frac{s(Q_r)}{Q_r}$  bliver  $2\%$ .

## 7.2 Ubestemtheden på det totale solindfald

Ved beregningen af det totale solindfald gennem vindueskonstruktionen indgår et korrektionsled for transmissionstabet  $Q_t$  gennem vindueskonstruktionen.

$$Q_{\text{total}} = Q_r + Q_t \quad \text{hvor}$$

$$Q_t = \frac{\vartheta_{R,i} - \vartheta_{R,u}}{M_1} \cdot A_1 + \frac{\vartheta_{G,i} - \vartheta_{G,u}}{M_2} \cdot A_2 \quad \text{kcal/h}$$

Ubestemtheden på den udvendige retningstemperatur  $\vartheta_{R,u}$  er som tidligere nævnt stor på grund af den store ubestemthed på strålingstemperaturen. Den udvendige retningstemperatur bestemmes af udtrykket

$$\vartheta_{R,u} = \left( \frac{\vartheta_s}{M_s} + \frac{\vartheta_l}{M_k} \right) \cdot M_R, \text{ der omskrives til}$$

$$\vartheta_{R,u} = \frac{\vartheta_s M_k + \vartheta_l M_s}{M_k + M_s}$$

$M_s$ 'afhængighed af  $\vartheta_s$  er så ubetydelig, at ophobningsloven kan anvendes på udtrykket for  $\vartheta_{R,u}$ .

$$s(\vartheta_{R,u}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \vartheta_{R,u}}{\partial \vartheta_s} s(\vartheta_s)\right)^2 + \left(\frac{\partial \vartheta_{R,u}}{\partial \vartheta_l} s(\vartheta_l)\right)^2 + \left(\frac{\partial \vartheta_{R,u}}{\partial M_s} s(M_s)\right)^2 + \left(\frac{\partial \vartheta_{R,u}}{\partial M_k} s(M_k)\right)^2}^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_s = 10^\circ\text{C} \quad s(\vartheta_s) = 3,0^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_l = 20^\circ\text{C} \quad s(\vartheta_l) = 0,2^\circ\text{C}$$

$$M_s = 0,22 \frac{^\circ\text{Cm}^2\text{h}}{\text{kcal}} \quad s(M_s) = 0,005 \frac{^\circ\text{Cm}^2\text{h}}{\text{kcal}}$$

$$M_k = 0,14 \frac{^\circ\text{Cm}^2\text{h}}{\text{kcal}} \quad s(M_k) = 0,01 \frac{^\circ\text{Cm}^2\text{h}}{\text{kcal}}$$

$$\frac{\partial \vartheta_{R,u}}{\partial \vartheta_s} = \frac{M_k}{M_k + M_s} = 0,39$$

$$\frac{\partial \vartheta_{R,u}}{\partial M_s} = \frac{M_k(\vartheta_s - \vartheta_1)}{(M_k + M_s)^2} = 11 \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

$$\frac{\partial \vartheta_{R,u}}{\partial \vartheta_1} = \frac{M_s}{M_k + M_s} = 0,61$$

$$\frac{\partial \vartheta_{R,u}}{\partial M_k} = \frac{M_s(\vartheta_s - \vartheta_1)}{(M_k + M_s)^2} = 17 \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

$$s(\vartheta_{R,u}) = \sqrt{(0,39 \cdot 3)^2 + (0,61 \cdot 0,2)^2 + (11 \cdot 0,005)^2 + (17 \cdot 0,01)^2} \approx \sqrt{1,37 + 0,02 + 0 + 0,03} \approx 1,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$s(\vartheta_{R,u})$  afhænger kun lidt af den absolutte størrelse af  $\vartheta_s$ , idet vi for  $\vartheta_s = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $\vartheta_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  får henholdsvis  $s(\vartheta_{R,u}) = 1,23 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $s(\vartheta_{R,u}) = 1,18 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Størrelsen af konvektionsmodstanden  $M_k$  er valgt svarende til de udførte målinger, d.v.s. ved ringe vindhastighed.

Ved større vindhastighed og dermed mindre konvektionsmodstand vil  $\frac{\partial \vartheta_{R,u}}{\partial \vartheta_s}$  aftage og standardafvigelsen  $s(\vartheta_{R,u})$  vil formindskes væsentlig.

Standardafvigelsen for transmissionstabet kan nu bestemmes.

$$s(Q_t) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_t}{\partial \vartheta_{R,i}} s(\vartheta_{R,i})\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial \vartheta_{R,u}} s(\vartheta_{R,u})\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial M_1} s(M_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial A_1} s(A_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial \vartheta_{g,i}} s(\vartheta_{g,i})\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial \vartheta_{g,u}} s(\vartheta_{g,u})\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial M_2} s(M_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_t}{\partial A_2} s(A_2)\right)^2} \text{ kcal/h}$$

$$\text{Idet } A_1 = 1,80 \text{ m}^2, \quad A_2 = 0,45 \text{ m}^2, \quad M_1 = 0,41 \frac{\text{ }^\circ\text{Cm}^2}{\text{kcal}},$$

$$M_2 = 0,18 \frac{\text{ }^\circ\text{Cm}^2}{\text{kcal}}, \quad \vartheta_{R,i} - \vartheta_{R,u} = 10 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \vartheta_{g,i} - \vartheta_{g,u} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$$

finder vi følgende værdier for de partielle afledede:

$$\frac{\partial Q_t}{\partial \vartheta_{R,i}} = \frac{A_1}{M_1} = 4,4 \text{ kcal/}^\circ\text{Ch}$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial \vartheta_{R,u}} = -\frac{A_1}{M_1} = -4,4 \text{ kcal/}^\circ\text{Ch}$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial A_1} = \frac{\vartheta_{R,i} - \vartheta_{R,u}}{M_1} = 24,4 \text{ kcal/m}^2\text{h} \quad \frac{\partial Q_t}{\partial M_1} = -\frac{\vartheta_{R,i} - \vartheta_{R,u}}{M_1^2} A_1 = -107 \frac{\text{kcal}^2}{\text{ }^\circ\text{Cm}^2\text{h}^2}$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial \vartheta_{g,i}} = \frac{A_2}{M_2} = 2,5 \text{ kcal/}^\circ\text{Ch}$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial \vartheta_{g,u}} = -\frac{A_2}{M_2} = -2,5 \text{ kcal/}^\circ\text{Ch}$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial A_2} = \frac{\vartheta_{g,i} - \vartheta_{g,u}}{M_2} = 28 \text{ kcal/m}^2\text{h} \quad \frac{\partial Q_t}{\partial M_2} = -\frac{\vartheta_{g,i} - \vartheta_{g,u}}{M_2^2} A_2 = -69 \frac{\text{kcal}^2}{\text{ }^\circ\text{Cm}^2\text{h}^2}$$

De målte værdier har følgende standardafvigelser:

$$s(A_1) = 0,01 \text{ m}^2, \quad s(A_2) = 0,01 \text{ m}^2, \quad s(M_1) = 0,01 \frac{\text{ }^\circ\text{Cm}^2\text{h}}{\text{kcal}},$$

$$s(M_2) = 0,005 \frac{\text{ }^\circ\text{Cm}^2\text{h}}{\text{kcal}},$$

$$s(\vartheta_{R,i}) = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}, \quad s(\vartheta_{R,u}) = 1,2 \text{ }^\circ\text{C}, \quad s(\vartheta_{g,i}) = 0,2 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$s(\vartheta_{g,u}) = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$s(Q_t) = \sqrt{0,2 + 27,9 + 1,1 + 0,1 + 0,3 + 0,3 + 0,1 + 0,1} \approx 5,5 \text{ kcal/h}$$

Det ses umiddelbart, at ubestemtheden på  $Q_t$  nedsættes væsentligt i det øjeblik, den udvendige strålingstemperatur bliver nøjagtigere bestemt ved hjælp af et måleinstrument.

Standardafvigelsen på det totale solindfald får følgende værdi:

$$s(Q_{\text{total}}) = \sqrt{(s(Q_r))^2 + (s(Q_t))^2} = \sqrt{15^2 + 5,5^2} \approx 16 \text{ kcal/h},$$

når  $Q_r$  er af størrelsesordenen 1000 kcal/h. Ved store solindfald har ubestemtheden på transmissionstabet kun ubetydelig indflydelse på ubestemtheden af det totale solindfald.

Når  $Q_r$  er af størrelsesordenen 100 kcal/h, får standardafvigelsen på det totale solindfald følgende værdi:

$$s(Q_{\text{total}}) = \sqrt{2^2 + 5,5^2} \approx 5,8 \text{ kcal/h}$$

Den relative ubestemthed på  $Q_{\text{total}}$  bliver i dette tilfælde 6%.

Det indses, at ved små solindfald har ubestemtheden på transmissionstabet en afgørende indflydelse på ubestemtheden af det totale solindfald.

### 7.3 Ubestemtheden på $Q_{\text{total}}$ når målingerne foretages med ventilation af kalorimetret

Varmemængden, som fjernes af ventilationsluften, bestemmes af

$$Q_{\text{luft}} = W \cdot \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \quad [\text{kcal/h}]$$

Opvarmningen  $\Delta t_1$  og  $\Delta t_2$  af luftmængden, som passerer henholdsvis kalorimetret og varmetræden, måles ved hjælp af skriveren i enheden mm, der er proportional med temperaturstigningen  $\Delta \theta$ .

Idet varmemængden  $W$ , som tilføres ventilationsluften, bestemmes af

$$W = U \cdot R \cdot 0,86$$

bliver den relative ubestemthed på  $Q_{\text{luft}}$  bestemt af følgende udtryk:

$$\frac{s(Q_{\text{luft}})}{Q_{\text{luft}}} = \sqrt{\left(2 \frac{s(U)}{U}\right)^2 + \left(\frac{s(R)}{R}\right)^2 + \left(\frac{s(\Delta t_1)}{\Delta t_1}\right)^2 + \left(\frac{s(\Delta t_2)}{\Delta t_2}\right)^2}$$

$$s(U) = 0,16 \text{ volt} \quad U = 25 \text{ volt} \quad s(R)/R = 0,5\%$$

$$s(\Delta t_1) = 1,6 \text{ mm} \quad s(\Delta t_2) = 1,3 \text{ mm} \quad t_1 \cong t_2 = 130 \text{ mm}$$

Standardafvigelsen på  $\Delta t_1$  er større end på  $\Delta t_2$  på grund af svingninger i luftens tilgangstemperatur.

$$\begin{aligned} \frac{s(Q_{\text{luft}})}{Q_{\text{luft}}} &= \sqrt{\left(2 \cdot \frac{0,16}{25}\right)^2 + (0,005)^2 + \left(\frac{1,6}{130}\right)^2 + \left(\frac{1,3}{130}\right)^2} \\ &= \sqrt{1,6 + 0,3 + 1,5 + 1,0 \cdot 10^{-2}} \cong 0,021 \cong 2\% \end{aligned}$$

Ubestemtheden på den varmemængde, som fjernes af ventilationsluften, er næsten den samme som ubestemtheden på den varmemængde, som fjernes af den cirkulerede vandmængde. Ubestemtheden på  $Q_{\text{total}}$  vil derfor ikke ændres væsentligt, når kalorimetret ventileres.

### 7.4 Ubestemtheden på afskærmningsfaktoren $F$

$$F = \frac{H_{\text{total}}^A}{H_{\text{total}}^U} = \frac{Q_{\text{total}}^A}{Q_{\text{total}}^U}$$

Ubestemtheden hidrørende fra transmissionstabet vil indgå i både tæller og nævner med samme størrelse og fortegn. Denne afhængighed mellem tæller og nævner er imidlertid i dette tilfælde ikke større, end at ophobningsloven kan anvendes på udtrykket for  $F$ .

Den relative ubestemthed på  $F$  bliver således

$$\frac{s(F)}{F} = \sqrt{\left(\frac{s(Q_{\text{total}}^A)}{Q_{\text{total}}^A}\right)^2 + \left(\frac{s(Q_{\text{total}}^U)}{Q_{\text{total}}^U}\right)^2}$$

Den relative ubestemthed på  $F$  er afhængig af størrelsen af solindfaldet. Eksempelvis finder vi således:

$$Q_{\text{total}}^A = Q_{\text{total}}^U = 1000 \text{ kcal/h} \quad F = 1,0$$

$$\frac{s(F)}{F} = \sqrt{0,016^2 + 0,016^2} \cong 0,023 \cong 2,5\%$$

$$Q_{\text{total}}^A = 500 \text{ kcal/h} \quad Q_{\text{total}}^U = 1000 \text{ kcal/h} \quad F = 0,5$$

$$\frac{s(F)}{F} = \sqrt{0,018^2 + 0,016^2} \cong 0,024 \cong 2,5\%$$

$$Q_{\text{total}}^A = 100 \text{ kcal/h} \quad Q_{\text{total}}^U = 1000 \text{ kcal/h} \quad F = 0,1$$

$$\frac{s(F)}{F} = \sqrt{0,06^2 + 0,016^2} \cong 0,062 \cong 6\%$$

I tilfælde, hvor vi alene måler den diffuse stråling, har vi eksempelvis:

$$Q_{\text{total}}^A = 70 \text{ kcal/h} \quad Q_{\text{total}}^U = 200 \text{ kcal/h} \quad F = 0,35$$

$$\frac{s(F)}{F} = \sqrt{0,06^2 + 0,03^2} \cong 6,5\%$$



## 8. KONTROLMÅLINGER

For at sikre, at de målte varmemængder virkelig svarer til de varme-mængder, som tilføres kalorimetret, foretages nogle kontrolmålinger, hvor den tilførte varmemængde er en kendt størrelse.

Varmetabet, som sker gennem vinduesåbningen, bestemmes ved disse målinger på den måde, at åbningen bag ruden dækkes af en 50 mm poly-styrenplade, hvori der er indsyet en termoelementkæde på 10 elemen-ter. Idet temperaturfaldet over pladen og dens varmeledningstal er kendte størrelser, kan varmetabet gennem åbningen beregnes.

Ved hjælp af nogle konstantantrådsvarmelegemer, der er anbragt midt i kalorimetercellen, tilføres denne en kendt varmemængde. Den tilførte energi bestemmes ved hjælp af en justeret elmåler med en nøjagtighed på  $\pm 0,3\%$ . Kontrolmålingerne foretages dels med en til-ført varmemængde på ca. 800 kcal/h og dels med en varmemængde på ca. 350 kcal/h. Endvidere foretages nogle målinger, hvor der ikke tilføres kalorimetret anden varme end den, der tilføres gennem iso-leringen.

Kontrolmålingerne gentages med forskellig temperaturdifferens mellem kalorimeter og udvendig luft.

Resultaterne af kontrolmålingerne uden ventilation af kalorimetre-ne er dels indført i skema 8.1-8.3 og dels afbildet grafisk.  $Q_r^a$  og  $Q_r^b$  er den registrerede varmemængde for henholdsvis kalorimeter a og b.  $Q_w^a$  og  $Q_w^b$  er den varmemængde, som tilføres kalorimetrene ved hjælp af varmelegemerne, mens  $\Delta Q^a$  og  $\Delta Q^b$  er differensen mellem den tilførte og den registrerede varmemængde. Benævnelsen er kcal/h. Måleinter-vallernes længde er 20 min. eller 30 min. som angivet i skema. Den tilførte varmemængde er noget svingende, idet strømforsyningen ikke er stabiliseret.

De enkelte intervalresultater kan ved bedømmelsen af ubestømthe-den ikke betragtes som gentagelsesmålinger, idet de er fortløbende ved samme temperaturniveau, vandmængde og visning på skriveren. Re-sultaterne for hver kontrolmåling vil derfor være behæftet med en eensidig fejl.

## SKEMA 8.1

### Kontrolmåling 1.

2.-2.-65. Intervalllængde = 30 min., kalorimetrets temperatur er ca. 10 °C højere end den udvendige temperatur.

| interval<br>nr. | $Q_r^a$       | $Q_r^b$ | $Q_r^a$<br>$Q_r^b$<br>middel | $Q_w^a$ | $Q_w^b$ | $\Delta Q^a$ | $\Delta Q^b$ | $\frac{\Delta Q^a}{Q_w^a} \cdot 10^2$ | $\frac{\Delta Q^b}{Q_w^b} \cdot 10^2$ |
|-----------------|---------------|---------|------------------------------|---------|---------|--------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                 | kcal pr. time |         |                              |         |         |              |              | %                                     |                                       |
| 1               | 783           | 803     |                              |         |         |              |              |                                       |                                       |
| 2               | 786           | 808     | 784 804                      | 807     | 813     | 23           | 9            | 2,8                                   | 1.1                                   |
| 3               | 782           | 801     |                              |         |         |              |              |                                       |                                       |
| 4               | 781           | 799     |                              |         |         |              |              |                                       |                                       |
| 5               | 781           | 800     | 781 800                      | 802     | 808     | 21           | 8            | 2.6                                   | 1.0                                   |
| 6               | 782           | 801     |                              |         |         |              |              |                                       |                                       |
| 7               | 787           | 808     |                              |         |         |              |              |                                       |                                       |
| 8               | 784           | 807     | 786 807                      | 805     | 812     | 19           | 5            | 2.4                                   | 0.6                                   |
| 9               | 786           | 807     |                              |         |         |              |              |                                       |                                       |
| 10              | 784           | 800     |                              |         |         |              |              |                                       |                                       |
| 11              | 785           | 801     | 787 804                      | 805     | 811     | 18           | 7            | 2.2                                   | 0.9                                   |
| 12              | 791           | 812     |                              |         |         |              |              |                                       |                                       |

### Kontrolmåling 2.

1.-5.-65. Intervalllængde = 20 min., kalorimetrets temperatur er lig udvendig temperatur.

|   |     |     |         |     |     |    |     |     |      |
|---|-----|-----|---------|-----|-----|----|-----|-----|------|
| 1 | 775 | 810 |         |     |     |    |     |     |      |
| 2 | 780 | 812 |         |     |     |    |     |     |      |
| 3 | 789 | 816 | 785 815 | 795 | 802 | 10 | -13 | 1.3 | -1.6 |
| 4 | 796 | 820 |         |     |     |    |     |     |      |
| 5 | 789 | 812 |         |     |     |    |     |     |      |
| 6 | 764 | 788 | 777 800 | 782 | 788 | 5  | -12 | 0.6 | -1.5 |
| 7 | 752 | 779 |         |     |     |    |     |     |      |
| 8 | 750 | 773 | 751 776 | 766 | 773 | 15 | -3  | 2.0 | -0.4 |

SKEMA 8.2

Kontrolmåling 3.

15.-10.-65. Intervallængde = 20 min., kalorimetrets temperatur er lig udvendig temperatur.

| interval<br>nr. | $Q_r^a$ | $Q_r^b$ | $Q_w^{a,b}$ | $\Delta Q^a$ | $\Delta Q^b$ | $\frac{\Delta Q^a}{Q_w} \cdot 10^2$ | $\frac{\Delta Q^b}{Q_w} \cdot 10^2$ |
|-----------------|---------|---------|-------------|--------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                 | kcal/h  |         |             |              |              | %                                   |                                     |
| 1               | 333     | 338     | 336         | 3            | -2           | 0.9                                 | -0.6                                |
| 2               | 336     | 338     | 341         | 5            | 3            | 1.5                                 | 0.9                                 |
| 3               | 331     | 337     | 339         | 8            | 2            | 2.4                                 | 0.6                                 |
| 4               | 337     | 342     | 344         | 7            | 2            | 2.0                                 | 0.6                                 |
| 5               | 333     | 341     | 348         | 15           | 7            | 4.3                                 | 2.0                                 |
| 6               | 336     | 345     | 348         | 12           | 3            | 3.4                                 | 0.9                                 |
| 7               | 340     | 347     | 347         | 7            | 0            | 2.0                                 | 0.0                                 |
| 8               | 338     | 347     | 348         | 10           | 1            | 2.9                                 | 0.3                                 |
| 9               | 336     | 344     | 350         | 14           | 6            | 4.0                                 | 1.7                                 |
| 10              | 338     | 348     | 350         | 12           | 2            | 3.4                                 | 0.6                                 |

Kontrolmåling 4.

21.-10.-65. Intervallængde = 30 min., kalorimetrets temperatur er 13-18 °C højere end udvendig temperatur.

|   |     |     |     |    |     |     |      |
|---|-----|-----|-----|----|-----|-----|------|
| 1 | 328 | 337 | 339 | 11 | 2   | 3.2 | 0.6  |
| 2 | 330 | 340 | 341 | 11 | 1   | 3.2 | 0.3  |
| 3 | 331 | 343 | 344 | 13 | 1   | 3.8 | 0.3  |
| 4 | 339 | 351 | 343 | 4  | -8  | 1.2 | -2.3 |
| 5 | 330 | 341 | 332 | 2  | -9  | 0.6 | -2.7 |
| 6 | 317 | 328 | 322 | 5  | -6  | 1.6 | -1.9 |
| 7 | 338 | 350 | 340 | 2  | -10 | 0.6 | -2.9 |

SKEMA 8.3

Kontrolmåling 5.

26.-10.-65. Intervallængde = 20 min., kalorimetrets temperatur er 1-4 °C lavere end udvendig temperatur.

| interval<br>nr. | $Q_r^a$ | $Q_r^b$ | $Q_w^{a,b}$ | $\Delta Q^a$ | $\Delta Q^b$ | $\frac{\Delta Q^a}{Q_w} \cdot 10^2$ | $\frac{\Delta Q^b}{Q_w} \cdot 10^2$ |
|-----------------|---------|---------|-------------|--------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                 | kcal/h  |         |             |              |              | %                                   |                                     |
| 1               | 350     | 354     | 345         | -5           | -9           | -1.5                                | -2.6                                |
| 2               | 350     | 355     | 345         | -5           | -10          | -1.5                                | -2.9                                |
| 3               | 350     | 354     | 345         | -5           | -9           | -1.5                                | -2.6                                |
| 4               | 348     | 353     | 345         | -3           | -8           | -0.9                                | -2.3                                |
| 5               | 346     | 350     | 345         | -1           | -5           | -0.3                                | -1.5                                |
| 6               | 350     | 352     | 345         | -5           | -7           | -1.5                                | -2.0                                |
| 7               | 347     | 352     | 345         | -2           | -7           | -0.6                                | -2.0                                |
| 8               | 346     | 351     | 345         | -1           | -6           | -0.3                                | -1.7                                |
| 9               | 346     | 349     | 345         | -1           | -4           | -0.3                                | -1.2                                |
| 10              | 347     | 351     | 345         | -2           | -6           | -0.6                                | -1.7                                |
| 11              | 345     | 344     | 345         | 0            | 1            | 0.0                                 | 0.3                                 |
| 12              | 346     | 351     | 345         | -1           | -6           | -0.3                                | -1.7                                |
| 13              | 344     | 352     | 345         | 1            | -7           | 0.3                                 | -2.0                                |

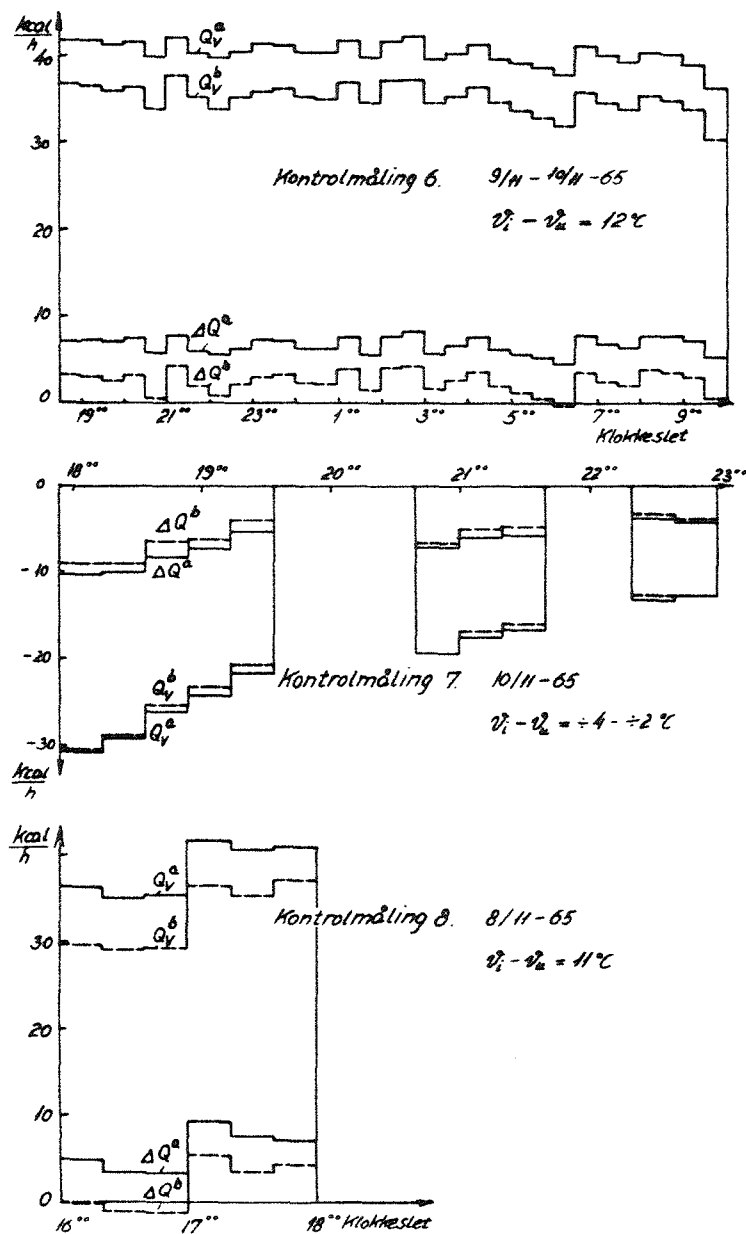


Fig. 26. Kontrolmåling nr. 6, 7 og 8.  
 Control-measuring 6, 7 and 8.

resultaterne af kontrolmålingerne, der viser, at varmetabene ved hjælp af varmetrådene, er afbildet grafisk på fig. 26.  $Q_v$  angiver den varmemængde, der er tilført af den cirkulerede vandmængde, og  $\Delta Q$  er differensen mellem den tilførte varmemængde og det beregnede varmetab gennem isolering og rand. Ved en fejlfri måling skulle  $\Delta Q$  altså være lig 0.

Af resultaterne (skema 8.1-8.3 og fig. 26) ses, at der er en tendens til, at varmetabet gennem isoleringen er større end beregnet. Endvidere ser man, at ubestemtheden på måleresultaterne for kalorimeter b stemmer overens med ubestemthedsoverslaget. For måleresultaterne på kalorimeter a gælder det imidlertid, at de har en ensidig forskydning i forhold til b, idet den registrerede varmemængde ved samtlige kontrolmålinger er mindre ved a end ved b. Ved måling nr. 6, 7 og 8 er den gennemsnitlige forskydning mellem a og b 4 kcal/h.

Forskellen mellem a og b er imidlertid så lille, at den er uden praktisk betydning.

I skema 8.4 er vist resultaterne af en kontrolmåling med ventilation af kalorimetrene. Forholdet mellem den varmemængde, der fjernes af henholdsvis vand og luft, ændrer sig under forsøget, idet tilgangstemperaturen på ventilationsluften ændrer sig. I skemaet er indført hele varmebalancen for de to kalorimetre. Ubestemtheden på målingerne er i overensstemmelse med usikkerhedsoverslaget.

Som sidste kontrol er de to kalorimeterceller endelig sammenlignet ved måling af direkte solindfald gennem en dobbeltrude under samme forhold. Kalorimetret har fulgt solen kontinuert, således at indfaldsvinklen i hele måleperioden har været 0. Måleresultaterne er indført i skema 8.5. Benævnelsen for den transmitterede varmemængde er  $\text{kcal/hm}^2$ . Idet arealet af vinduesåbningen er  $1,8 \text{ m}^2$ , er den registrerede varmemængde således af størrelsesordenen 1100 kcal/h.

Forskellen mellem den totale stråling, som måles med kalorimeter a og b, er mindre end 2%, hvilket er i overensstemmelse med usikkerhedsoverslaget. Den indvendige og udvendige overfladetemperatur på termoruden i b var ca.  $1^\circ\text{C}$  højere end i a ved denne måling, mens de var fuldstændig sammenfaldende ved målinger om natten. Termoruden i b, der ikke er af samme produktionsserie som ruden i a, absorberer altså lidt mere af den kortbølgede stråling end a. Dette er i overensstemmelse med den forskel, der er på den transmitterede kortbølgede stråling.

Den kortbølgede stråling, som måles ved hjælp af solarimetrene, stemmer også overens med den beregnede kortbølgede stråling. Ved samtlige målinger, der er foretaget med solkalorimetret, er det blevet observeret, at den målte kortbølgede stråling i begyndelsen af måleperioden er større end den beregnede, og at forskellen aftager i løbet af måleperioden. Årsagen hertil er måske, at solarimetrets basis opvarmes under målingerne og derved ændres kalibreringskonstanten. En undersøgelse af dette forhold er endnu ikke foretaget. Ændringerne er imidlertid så små, at de er uden praktisk betydning.

#### SKEMA 8.4

#### Kontrolmåling 9.

28.-4.-65. Intervallængde = 20 min., kalorimetrets temperatur er ca. 3-5 °C højere end udvendig temperatur.

| interval<br>nr. | $Q_V$ | $Q_{\text{luft}}$ | $Q_{\text{tab}}$ | $Q_b$ | $Q_r$ | $Q_{r \text{ middel}}$ | $Q_w$ | $\Delta Q$ | $\frac{\Delta Q}{Q_w} \cdot 10^2$ |
|-----------------|-------|-------------------|------------------|-------|-------|------------------------|-------|------------|-----------------------------------|
| kcal pr. time   |       |                   |                  |       |       |                        |       |            | %                                 |
| Kalorimeter a   |       |                   |                  |       |       |                        |       |            |                                   |
| 1               | 653   | 140               | -10              | 0     | 783   |                        |       |            |                                   |
| 2               | 668   | 121               | -9               | 0     | 780   | 784                    | 798   | 14         | 1.8                               |
| 3               | 662   | 133               | -11              | 4     | 788   |                        |       |            |                                   |
| 4               | 667   | 112               | -12              | 2     | 769   |                        |       |            |                                   |
| 5               | 672   | 140               | -13              | -10   | 789   | 786                    | 794   | 8          | 1.0                               |
| 6               | 640   | 169               | -12              | 2     | 799   |                        |       |            |                                   |
| 7               | 643   | 130               | -10              | 12    | 775   |                        |       |            |                                   |
| 8               | 681   | 64                | -8               | 14    | 751   | 769                    | 792   | 23         | 2.9                               |
| 9               | 722   | 74                | -8               | -8    | 780   |                        |       |            |                                   |
| 10              | 700   | 89                | -8               | 0     | 781   |                        |       |            |                                   |
| 11              | 716   | 42                | -6               | 10    | 762   | 774                    | 794   | 20         | 2.5                               |
| 12              | 774   | 18                | -6               | -6    | 780   |                        |       |            |                                   |
| Kalorimeter b   |       |                   |                  |       |       |                        |       |            |                                   |
| 1               | 639   | 184               | -19              | -2    | 802   |                        |       |            |                                   |
| 2               | 653   | 171               | -18              | -2    | 804   | 805                    | 804   | -1         | -0.1                              |
| 3               | 641   | 181               | -18              | 4     | 808   |                        |       |            |                                   |
| 4               | 649   | 153               | -18              | 2     | 786   |                        |       |            |                                   |
| 5               | 645   | 202               | -19              | -12   | 816   | 806                    | 800   | -6         | -0.8                              |
| 6               | 618   | 210               | -17              | 4     | 815   |                        |       |            |                                   |
| 7               | 628   | 160               | -15              | 14    | 787   |                        |       |            |                                   |
| 8               | 671   | 84                | -12              | 16    | 759   | 780                    | 798   | 18         | 2.3                               |
| 9               | 700   | 119               | -14              | -10   | 795   |                        |       |            |                                   |
| 10              | 680   | 133               | -16              | 2     | 799   |                        |       |            |                                   |
| 11              | 705   | 61                | -14              | 10    | 762   | 783                    | 800   | 17         | 2.1                               |
| 12              | 755   | 54                | -14              | -6    | 789   |                        |       |            |                                   |

SKEMA 8.5

Kontrolmåling 10.

7.-6.-65. Solindfald gennem uafskærmet vindue.

| 1                | 2  | 3                    | 4   | 5               | 6                      | 7   | 8                     | 9                      | 10  | 11                    |
|------------------|----|----------------------|-----|-----------------|------------------------|-----|-----------------------|------------------------|-----|-----------------------|
| kl.              | h  | $H_{total}$<br>a b   |     | $\frac{a-b}{b}$ | $H_k^a$<br>$a_m$ $a_b$ |     | $\frac{a_m-a_b}{a_m}$ | $H_k^b$<br>$b_m$ $b_b$ |     | $\frac{b_m-b_b}{b_m}$ |
|                  |    | kcal/hm <sup>2</sup> |     | %               | kcal/hm <sup>2</sup>   |     | %                     | kcal/hm <sup>2</sup>   |     | %                     |
| 9 <sup>46</sup>  | 49 | 643                  | 635 | 1.3             | 598                    | 585 | 2.2                   | 581                    | 567 | 2.4                   |
| 10 <sup>06</sup> | 51 | 650                  | 642 | 1.2             | 601                    | 592 | 1.5                   | 587                    | 573 | 2.4                   |
| 10 <sup>26</sup> | 53 | 658                  | 647 | 1.7             | 607                    | 598 | 1.5                   | 592                    | 579 | 2.2                   |
| 10 <sup>46</sup> | 54 | 664                  | 652 | 1.8             | 610                    | 603 | 1.2                   | 597                    | 583 | 2.4                   |
| 11 <sup>06</sup> | 56 | 664                  | 654 | 1.5             | 610                    | 602 | 1.3                   | 597                    | 585 | 2.0                   |
| 11 <sup>36</sup> | 56 | 667                  | 655 | 1.8             | 611                    | 604 | 1.2                   | 598                    | 586 | 2.0                   |
| 11 <sup>56</sup> | 57 | 665                  | 652 | 2.0             | 608                    | 603 | 0.8                   | 595                    | 582 | 2.2                   |
| 12 <sup>16</sup> | 57 | 667                  | 656 | 1.7             | 612                    | 604 | 1.3                   | 601                    | 586 | 2.5                   |
| 12 <sup>36</sup> | 56 | 669                  | 658 | 1.7             | 611                    | 607 | 0.7                   | 600                    | 589 | 1.8                   |
| 12 <sup>56</sup> | 55 | 670                  | 659 | 1.7             | 612                    | 608 | 0.7                   | 600                    | 590 | 1.7                   |
| 13 <sup>16</sup> | 54 | 668                  | 657 | 1.7             | 608                    | 607 | 0.2                   | 596                    | 588 | 1.3                   |
| 13 <sup>36</sup> | 53 | 666                  | 654 | 1.8             | 605                    | 606 | -0.2                  | 592                    | 587 | 0.8                   |
| 13 <sup>56</sup> | 51 | 664                  | 651 | 2.0             | 602                    | 604 | -0.3                  | 590                    | 583 | 1.2                   |
| 14 <sup>16</sup> | 48 | 657                  | 648 | 1.4             | 596                    | 598 | -0.3                  | 584                    | 581 | 0.5                   |
| 14 <sup>36</sup> | 46 | 653                  | 642 | 1.7             | 589                    | 593 | -0.7                  | 578                    | 575 | 0.5                   |

Kolonne 1 og 2 angiver klokkeslet i sand soltid og solhøjden.

Kolonne 3 og 4 angiver det totale solindfald gennem termoruden.

Kolonne 5 angiver forskellen i % mellem den målte transmitterede solvarme for kalorimeter a og b.

Kolonne 6 angiver den transmitterede kortbølgede stråling for a målt ved hjælp af solarimetret.

Kolonne 7 angiver den beregnede kortbølgede stråling for a.

Kolonne 8 angiver forskellen i % mellem de målte og beregnede værdier.

Kolonne 9, 10 og 11 gælder for kalorimeter b som 6, 7 og 8 gælder for a.

9. MÅLINGER MED SOLKALORIMETRET

9.1 Forsøgsgangen

Ved hjælp af sigtet indstilles kalorimeterkassen, således at den ønskede indfaldsvinkel for solstrålingen til vinduet nås. Ved målingerne, der er foretaget her, ligger indfaldsvinklen i det lodrette normalplan til ruden. Det er denne indfaldsvinkel, profilvinklen, der er bestemmende for afskærmningsfaktoren i de tilfælde, hvor den er en funktion af solhøjden. Indfaldsvinklen holdes konstant under hele målingen, idet kalorimetret følger solens bevægelse.

Af skrivers visning ses, hvornår stationær tilstand er nået, hvorefter selve målingen ved den pågældende indfaldsvinkel begynder. Et måleinterval er normalt på 20 minutter. Størrelsen af den cirkulerende vandmængde vælges, således at man får en passende opvarmning af denne (ca. 2 °C). Vandmængden bestemmes ved aflæsning af vandmålerens visning og klokkeslet med 20 minutters mellemrum. Forholdet mellem den direkte og diffuse stråling bestemmes som tidligere beskrevet i hver måleperiode. Anemometrets visning aflæses hvert 20. minut, ligesom der foretages en måling med psykrometret.

På en måledag måles solindfaldet ved forskellige indfaldsvinkler. Ændringen af indfaldsvinklen sker med spring på 10°. Da ændringen i strålingsintensiteten ikke er stor ved så små spring, får man hurtig en stationær tilstand. Når tilstanden betegnes stationær, er dette en tilnærmelse, idet strålingsintensiteten på en flade vinkelret på stråleretningen ændrer sig i dagens løb. Inden for et måleinterval er ændringerne imidlertid så små, at de er uden betydning. Ved solnedgang aftager intensiteten dog så meget, at det påvirker målingerne. Glassets og afskærmningens temperatur vil i dette tilfælde være højere end svarende til den pågældende strålingsintensitet.

Det totale diffuse solindfald for det afskærmede og uafskærmede vindue måles på en anden dag. Kalorimetret indstilles da således, at ruderne er lodrette, og den direkte stråling rammer kalorimetret med en indfaldsplan, der danner en vinkel på godt 90° med rudernes normal. Jordoverfladen foran vinduerne er således solbeskinnede som ved måling af totalstrålingen.

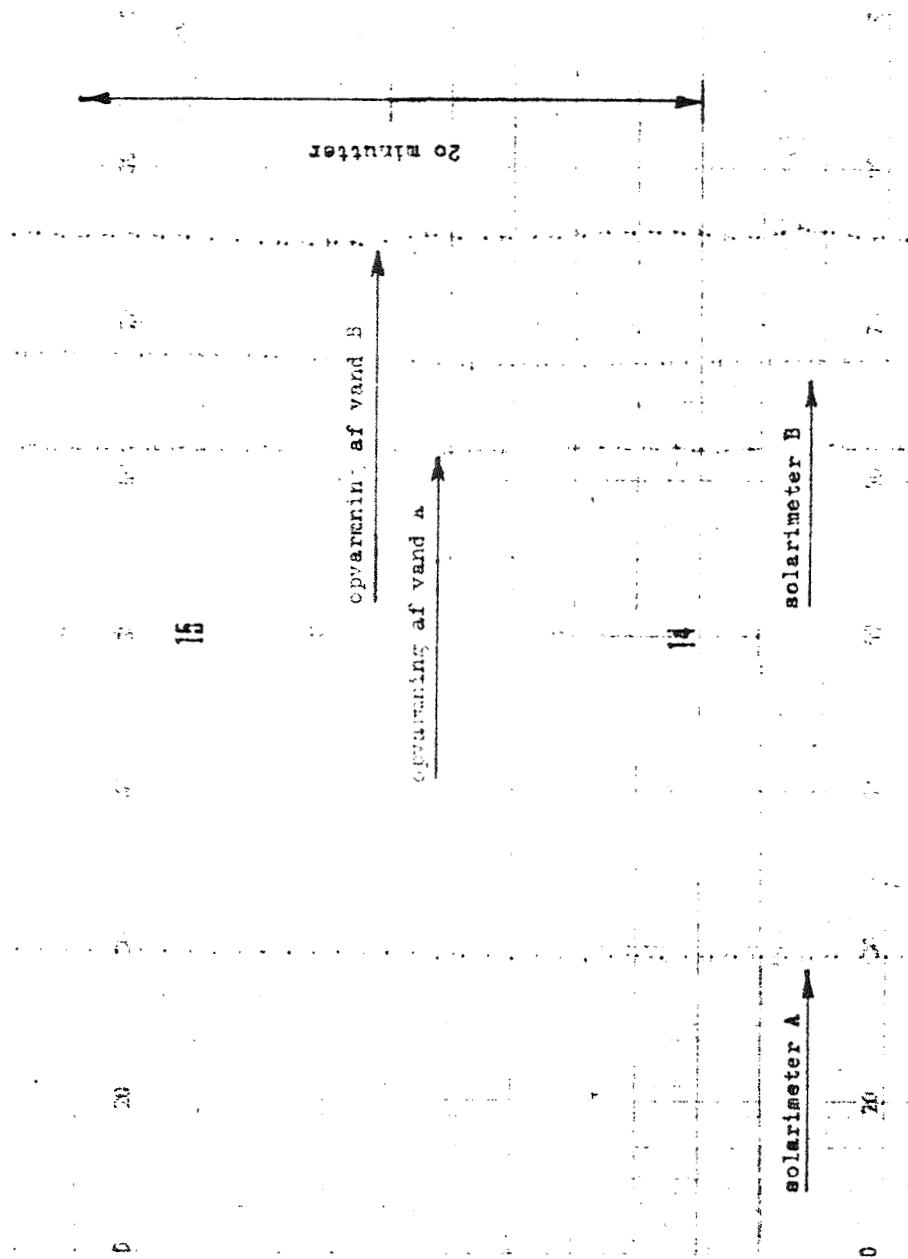


Fig. 27 a. Udsnit af en skivers registreringspapir.  
Section of the recording-paper of a multipoint-recorder.

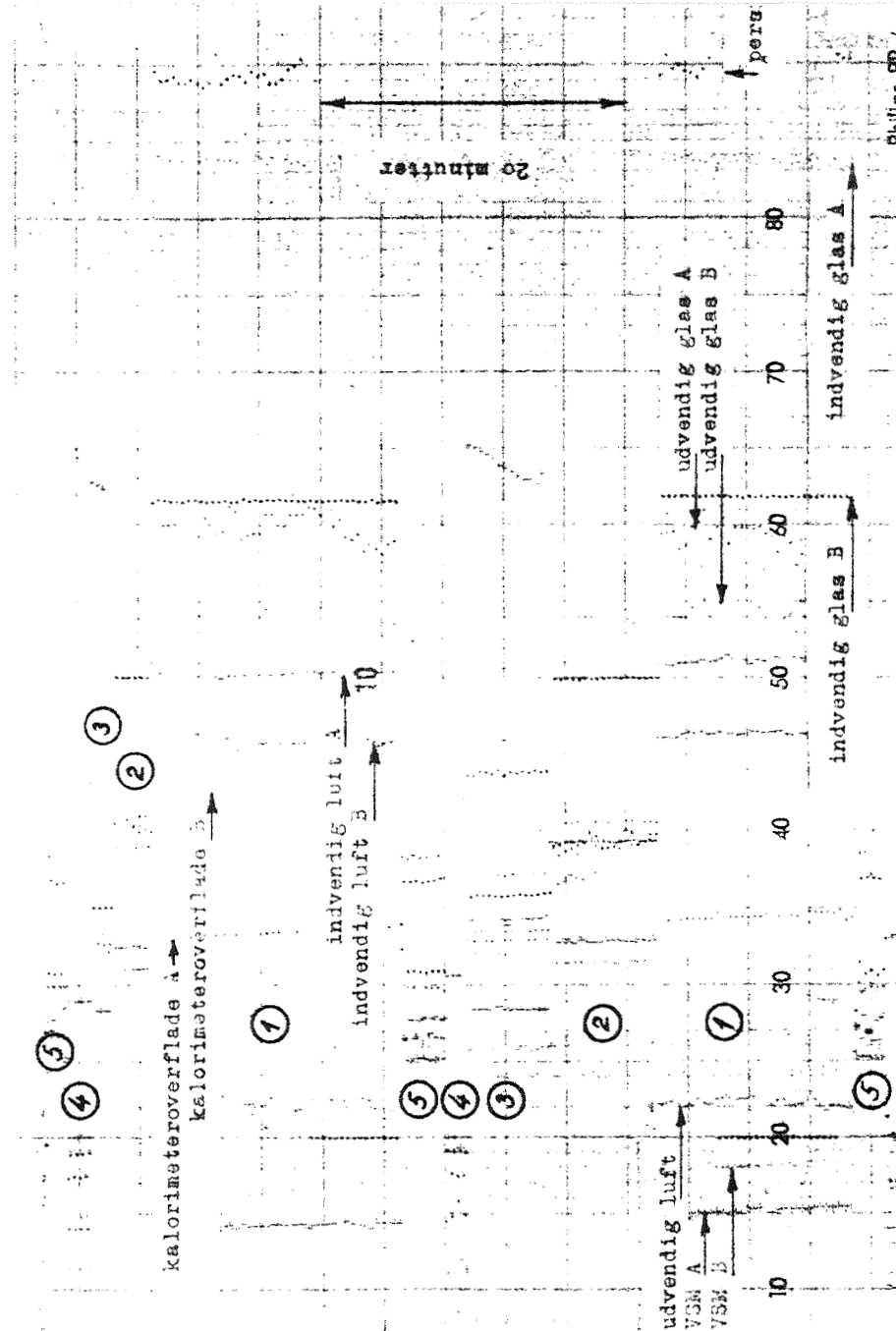


Fig. 27 b. Udsnit af en skivers registreringspapir.  
Section of the recording-paper of a multipoint-recorder.

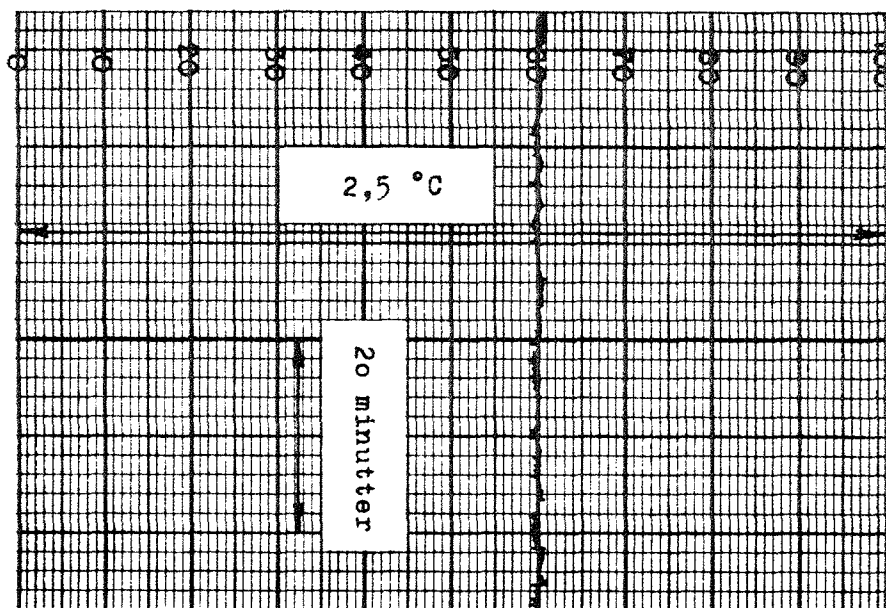


Fig. 27 c. Udsnit af linieskriverens registreringspapir.  
Section of the recording-paper of the strip chart recorder.

Fig. 27a,b,c viser et udsnit af registreringspapiret fra de tre skrivere ved en måling (uden ventilation) med et hvidt gardin som solafskærmning. Den cirkulerende vandmængdes opvarmning og solarimetrenes visning ses på fig. a. I dette tilfælde kan middelværdierne i et måleinterval let bestemmes ved en grafisk udjævning. I tilfælde, hvor intensiteten er svingende, findes middelværdierne ved planimering af kurverne. Fig. b viser registreringen af temperaturer og varmestømme målt på de fem multistik. På multistik nr. 1 måles middelværdien af termospændingerne, mens de enkelte elementers spænding måles på de resterende multistik. Temperaturerne aflæses direkte i °C ved hjælp af linealer, der er inddelt i overensstemmelse med termoelementtrådens justeringskurve. Fig. c viser temperaturvariationerne på tilgangsvandet. Da 100 inddelinger er 2,5 °C, ses det, at den kan holdes ret konstant.

De aflæste værdier indsættes i formlerne for kalorimetrets varmebalance, hvorefter den totale solvarme, som transmitteres gennem det afskærmede og uafskærmede vindue, kan beregnes.

### 9.2 Beregning af kortbølget stråling

Den kortbølgede stråling, som måles ved hjælp af solarimetrene, kan også beregnes i de tilfælde, hvor vinduets indvendige begrænsningsflade er en glasflade. Varmevekslingen ved langbølget stråling og konvektion mellem den indvendige glasflade og kalorimetercellen kan beregnes, idet varmeafgivelsen fra ruden er bestemt af

$$Q_{R,i} = \frac{\vartheta_{g,i} - \vartheta_{R,i}}{M_{R,i}} \cdot A,$$

hvor  $M_{R,i}$  er det resulterende modstandstal (Appendix A). Modstandstallet for konvektion  $M_i^k$  er ved termisk konvektion bestemt af

$$M_i^k = K^k \vartheta^k = 0,8(\vartheta_{g,i} - \vartheta_{l,i})^{-0,25}$$

Formfaktoren  $K^k$  gælder for en lodret flade. Ved beregningerne er denne værdi af faktoren også benyttet i de tilfælde, hvor ruden har været skrå. Da usikkerheden på  $K^k$  er stor, og glassets hældning sjældent er større end 45°, har dette næppe nogen betydning.

Den kortbølgede stråling bestemmes da som differensen mellem den totale varmestøm gennem ruden og den beregnede varme, som ruden afgiver ved langbølget stråling og konvektion.

### 9.3 Beregning af afskærmningsfaktoren

Afskærmningsfaktorerne  $F$  og  $F_d$  kan umiddelbart beregnes af målingerne som tidligere beskrevet. Når man kender forholdet mellem den direkte og diffuse transmitterede stråling for den uafskærmede termorude, kan afskærmningsfaktoren  $F_D$  for den direkte stråling beregnes. Til bestemmelse af  $F_D$  har vi følgende

$$F = \frac{H^A}{H^U}; \quad (9.3.1) \quad \frac{H_d^U}{H_D^U} = a, \quad (9.3.2)$$

$$F_D = \frac{H_D^A}{H_D^U}; \quad (9.3.3) \quad F_d = \frac{H_d^A}{H_d^U} \quad (9.3.4)$$

Af 9.3.2 fås

$$\frac{H_D^U + H_d^U}{H_D^U} = 1 + a \quad \text{eller} \quad \frac{H^U}{H_D^U} = 1 + a$$

Idet man har

$$H^A = H_D^A + H_d^A = H_D^A + F_d \cdot H_d^U \quad \text{eller}$$

$$H_D^A = H^A - F_d \cdot H_d^U$$

fås

$$F_D = \frac{H_D^A}{H_D^U} = \frac{H^A}{H_D^U} - \frac{F_d \cdot H_d^U}{H_D^U}$$

$$F_D = \frac{H^A}{H^U} (1 + a) - a \cdot F_d$$

$$\underline{F_D = (1 + a)F - a \cdot F_d} \quad (9.3.5)$$

## 10. MÅLERESULTATER

I sommerhalvåret 1965 er der ved hjælp af solkalorimetret foretaget målinger på 4 forskellige solafskærmninger, nemlig en specialrude, et hvidt gardin bag en termorude, en hvid persienne bag en termorude og en udvendig sølvgrå persienne. Resultaterne af disse målinger er afbildet grafisk og kommenteret i de følgende afsnit.

Intensiteten af den totale transmitterede solstråling samt intensiteten af den målte og beregnede kortbølgede stråling for det afskærmede og uafskærmede vindue er tegnet som funktion af klokkeslettet (M.E.T.). Hvert punkt repræsenterer den gennemsnitlige intensitet i et måleinterval på 20 minutter. Solhøjden samt indfaldsvinklen (profilvinklen) er også angivet for hvert måleinterval. Rudens hældning i forhold til lodret er da bestemt ved differensen mellem disse to vinkler.

De beregnede afskærmningsfaktorer er afbildet som funktion af indfaldsvinklen (profilvinklen).

Symboler på kurverne er angivet i nedenstående skema.

|        |                      |   |
|--------|----------------------|---|
| ●—●    | $H_{\text{total}}^U$ | total transmitteret solvarme gennem uafskærmet dobbeltrude.                         |
| ○—○    | $H_{k,m}^U$          | den målte transmitterede kortbølgede stråling gennem en uafskærmet dobbeltrude.     |
| +----+ | $H_{k,b}^U$          | den beregnede transmitterede kortbølgede stråling gennem en uafskærmet dobbeltrude. |
| ●—●    | $H_{\text{total}}^A$ | total transmitteret solvarme gennem afskærmet vindue.                               |
| ○—○    | $H_{k,m}^A$          | den målte transmitterede kortbølgede stråling gennem afskærmet vindue.              |
| +----+ | $H_{k,b}^A$          | den beregnede transmitterede kortbølgede stråling gennem afskærmet vindue.          |
| Δ---Δ  | $i$                  | indfaldsvinklen (profilvinklen).  |
| -----  | $h$                  | solhøjden.  |
| ●—●    | $F$                  | afskærmningsfaktoren for totalstrålingen.   |
| ○—○    | $F_k$                | afskærmningsfaktoren for den kortbølgede stråling.                                  |
| ○—○    | $F_D$                | afskærmningsfaktoren for den direkte stråling.                                      |
| —      | $F_d$                | afskærmningsfaktoren for den diffuse stråling.                                      |



I U.S.A har man ved hjælp af et lignende kalorimeter foretaget målinger på forskellige afskærmninger. Nogle af disse målinger er ligeledes omtalt, og hvor det er muligt, er disse resultater sammenlignet med egne.

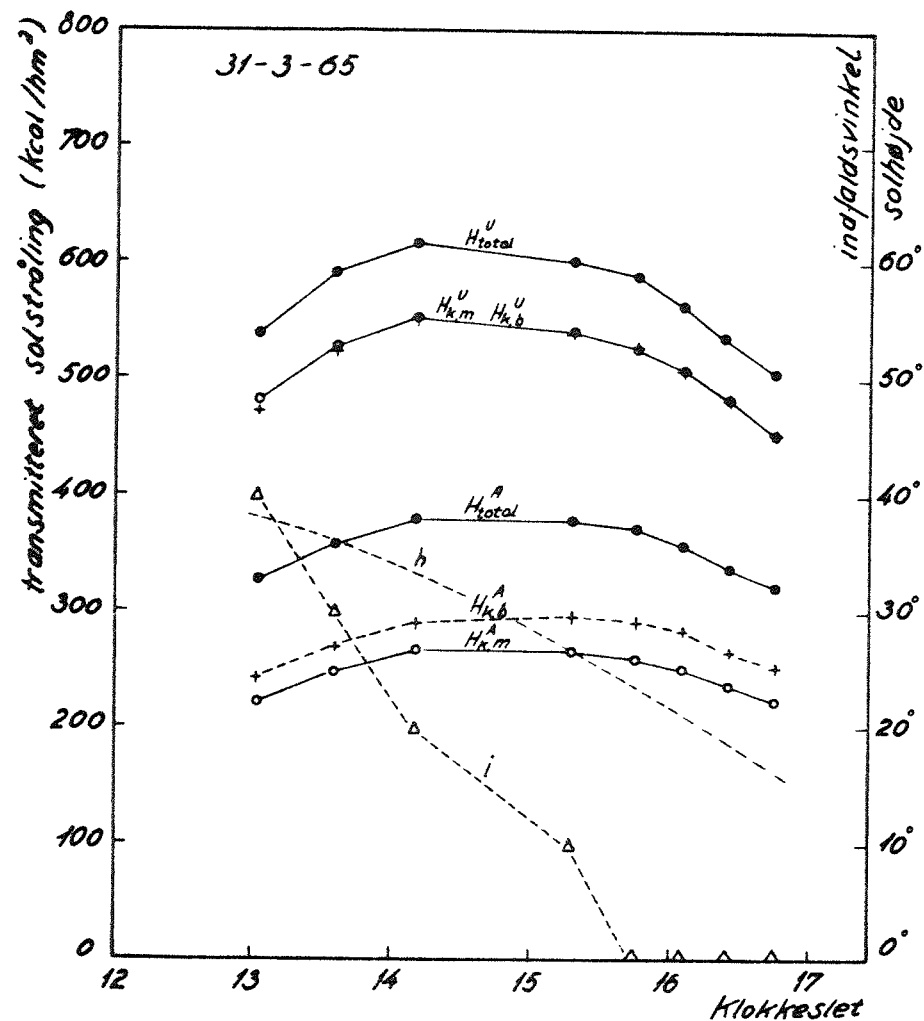


Fig. 28. Måleresultater for dobbeltrude med perler mellem ruderne.  
Results found by measuring for double pane with beads between the glasses.

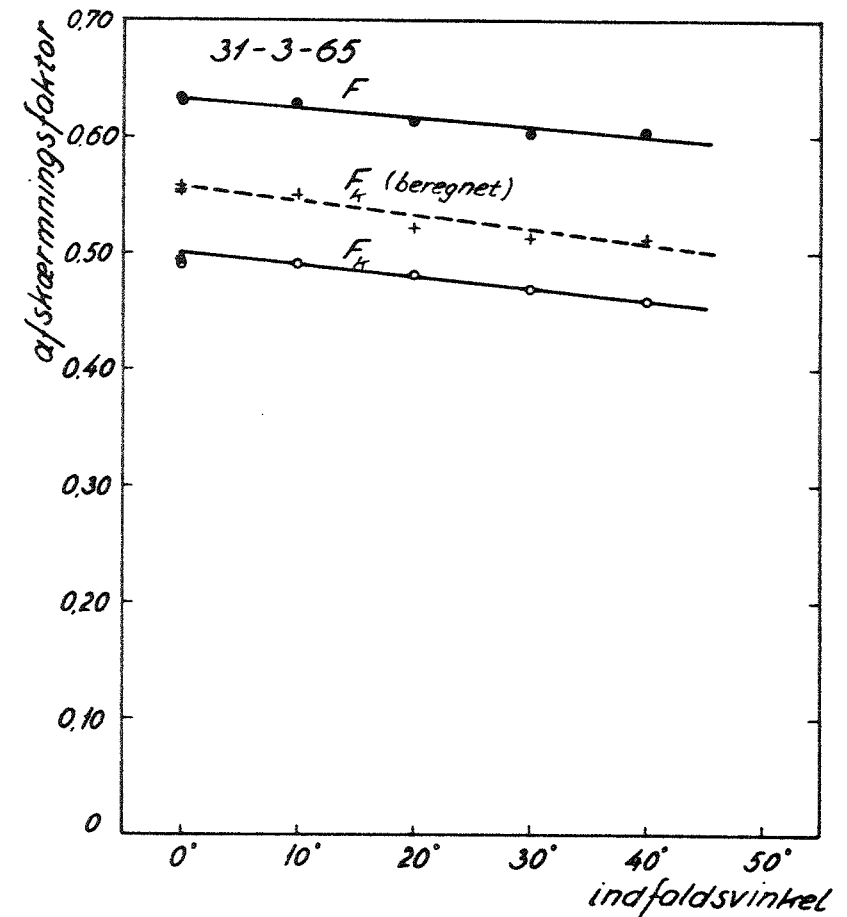


Fig. 29. Afskærmningsfaktor for dobbeltrude med perler mellem ruderne.  
Shade factor for double pane with beads between the glasses.

#### 10.1 Solafskærmende rude

Den solafskærmende rude er konstrueret af 2 lag 5 mm glas med en indbyrdes afstand på ca. 1 mm. Mellemrummet er fyldt med små perler, som reflekterer en del af den indfaldende stråling. Målingerne på denne er foretaget omkring april. På fig. 28 og 29 er afbildet måleresultaterne fra d. 31-3. Målingerne foregik ved skyfri himmel med rolige vindforhold omkring kalorimetret.

For specialruden er den beregnede værdi af den kortbølgede stråling større end den målte. Årsagen hertil er, at den kortbølgede stråling langt fra er jævnt fordelt over hele ruden, idet perlelaget er tyndest ved kanterne og omkring midtpunktet, hvor ruderne er limet sammen, og tykkest på de steder, hvor afstanden til kant og midtpunkt er størst. Da solarimetret sidder et fast sted bag ruden, vil dets visning i dette tilfælde ikke være et mål for den transmitterede kortbølgede stråling for hele ruden.

Da ruden med perlerne absorberer en del af den indfaldende stråling, vil den antage en temperatur, der er højere end omgivelserne. På grundlag af temperaturmålingerne er rudens absorption af den indfaldende stråling beregnet til 30%. Denne varme afgives dels til det fri og dels til rummet. Når vi har samme temperatur ude og inde, er det overgangsmønstrene, der er bestemmende for fordelingen af varmen. Ved målinger i stærk blæst fandt man da også en mindre værdi for afskærmningsfaktoren.

Forholdet mellem den transmitterede stråling for ruden med perlerne og dobbeltruden afhænger kun lidt af indfaldsvinklen. Målingen af afskærmningsfaktoren for den diffuse stråling viste sig da også at være den samme som for den direkte stråling.

#### 19.2 Hvidt gardin bag termorude

Gardinet er af hvidt tætvet lærred (bomuld, 25 tråde pr. 10 cm, 180 g pr.  $\text{m}^2$ ). Det er foldet, således at 1,3 m gardin er fordelt over den 1 m brede åbning.

Refleksionskoefficienten for gardinet er, når det er glat, målt til 0,65 ved hjælp af et solarimeter. Målingen sker på den måde, at man dels måler intensiteten, som rammer gardinet, der er spændt ud på en lodret væg med sort baggrund, og dels måler intensiteten af den reflekterede stråling.

Ved målingerne med kalorimetret blev gardinet anbragt bag termoruden på to forskellige måder. I det ene tilfælde var der en spalte ved gulv og loft, således at der skete en varmeveksling mellem kalorimetret og rummet mellem glas og gardin på grund af naturlig konvektion. I det andet tilfælde sluttede gardinet tæt til kanten hele vejen rundt (fig. 31).

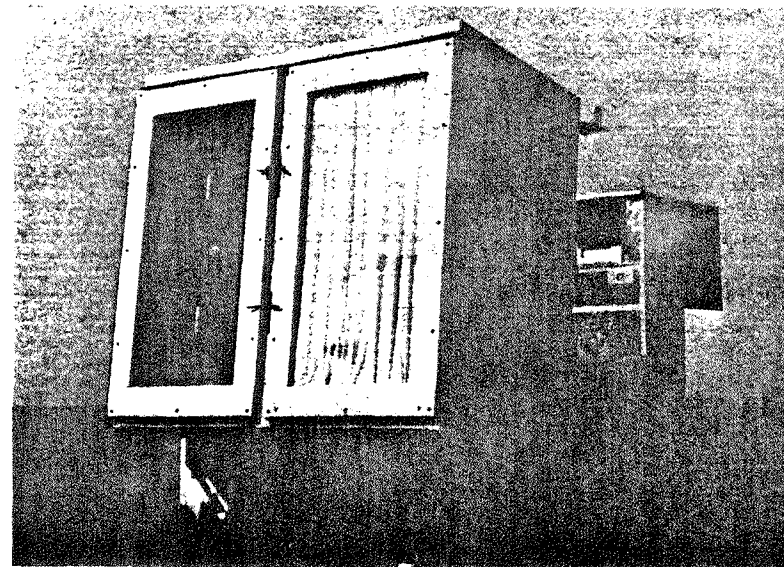


Fig. 30. Solkalorimetret med hvidt gardin.  
The solar calorimeter with white curtain.

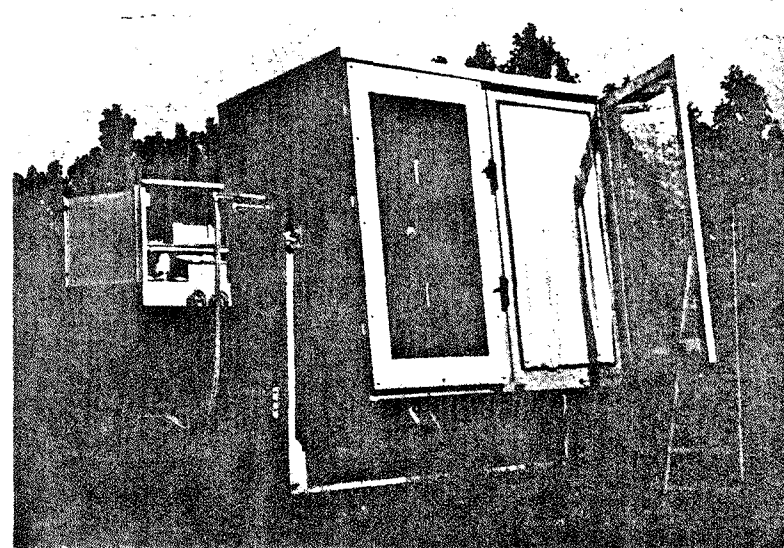


Fig. 31. Solkalorimetret med hvidt gardin.  
The solar calorimeter with white curtain.

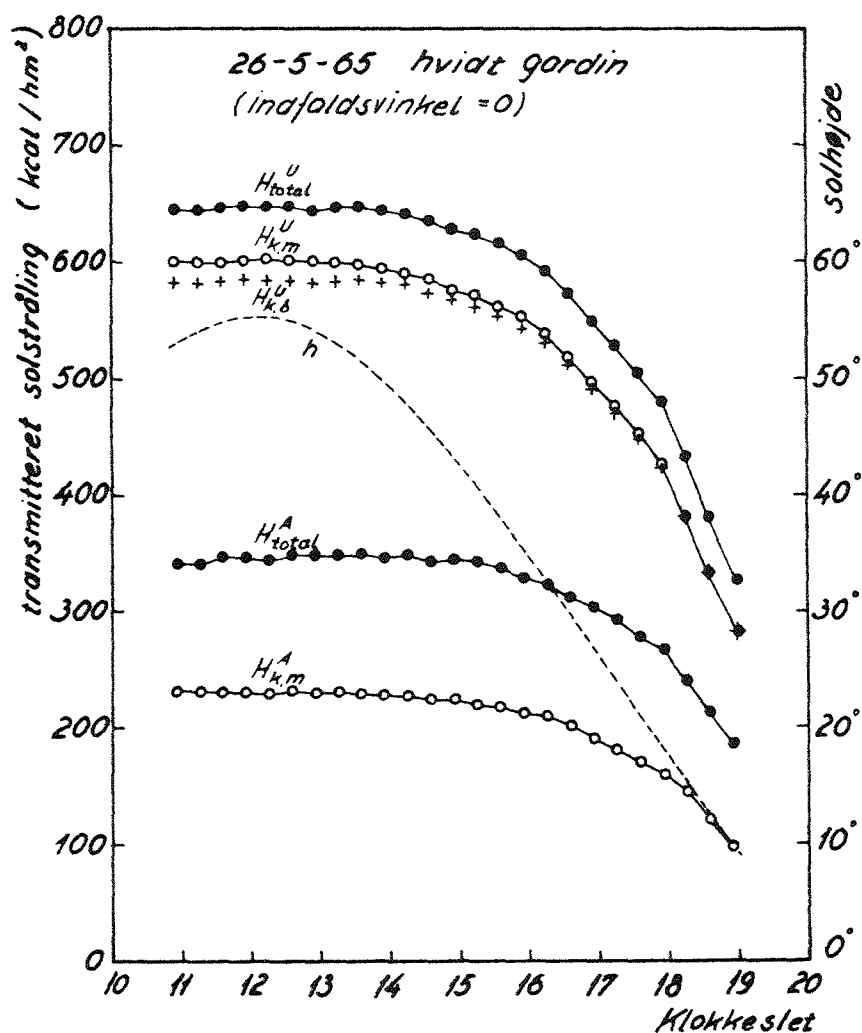


Fig. 32. Måleresultater for hvidt gardin bag en dobbeltrude.  
Results found by measuring for white curtain behind a double pane.

Ved målingerne den 26-5 var gardinet anbragt 10 cm bag ruden med en spalte ved gulv og loft. Målingerne forløb kontinuert hele dagen med indfaldsvinklen lig 0. Der var skyfri himmel og en vindhastighed på ca. 2 m/sek. Måleresultaterne er afbildet på fig. 32 og fig. 33. Afskærmningsfaktoren  $F$  er svagt stigende med tiden. Årsagen hertil

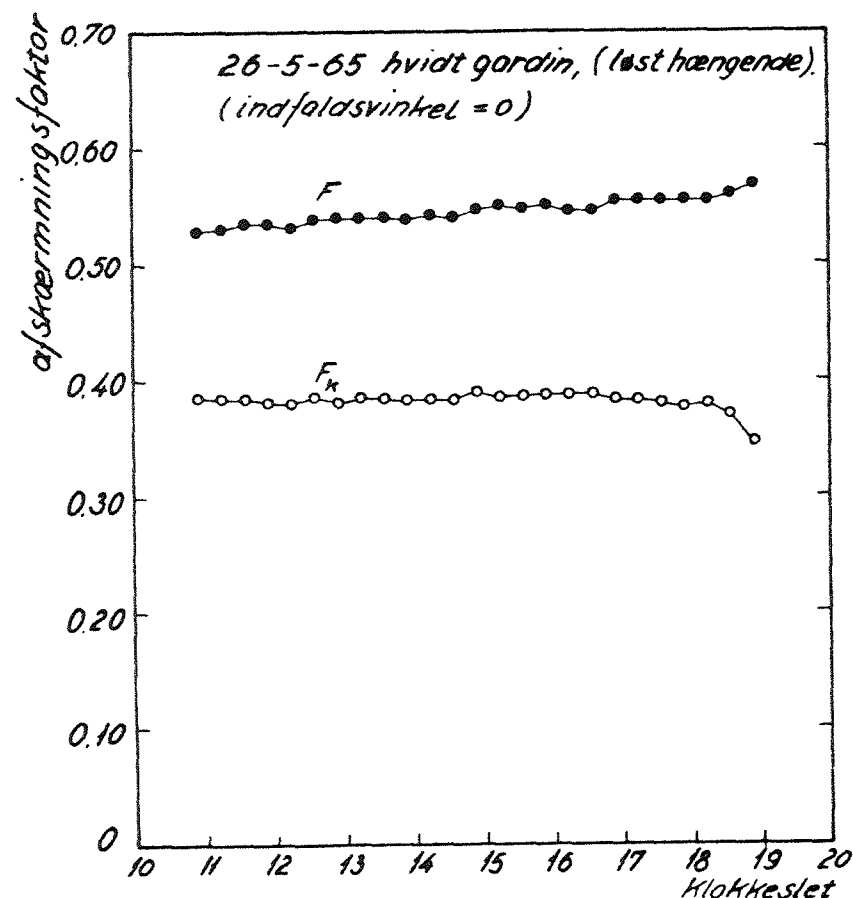


Fig. 33. Afskærmningsfaktor for hvidt gardin bag en dobbelt rude.  
Shade factor for white curtain behind a double pane. (*Scaled curtain*).

kan dels være ændringer i konvektionsforholdene omkring gardinet, når vinduets hældning ændres, og dels skyldes den aftagende strålingsintensitet.

Værdien af  $F_k$  er ret konstant, men skal tages med forbehold, idet gardinet sidder helt op til solarimetret. Den diffuse stråling, som transmitteres gennem gardinet, må i dette tilfælde måles på den måde, at solarimetret forskydes på tværs af gardinets folder, således at man kan bestemme den gennemsnitlige transmitterede stråling. En sådan måling foreligger endnu ikke. Den transmitterede kortbølgede stråling

kan ikke umiddelbart sammenlignes med den tidligere målte reflekterede, dels fordi gardinet er foldet, og dels fordi en del af den reflekterede stråling atter reflekteres fra termoruden.

Ved målingerne den 5-6 og 6-6 var gardinet anbragt på trækanten lige bag glasset, uden åbninger ved gulv og loft. Der var skyfri himmel og svag vind, ca. 1 m/sek. Måleresultaterne er afbildet på

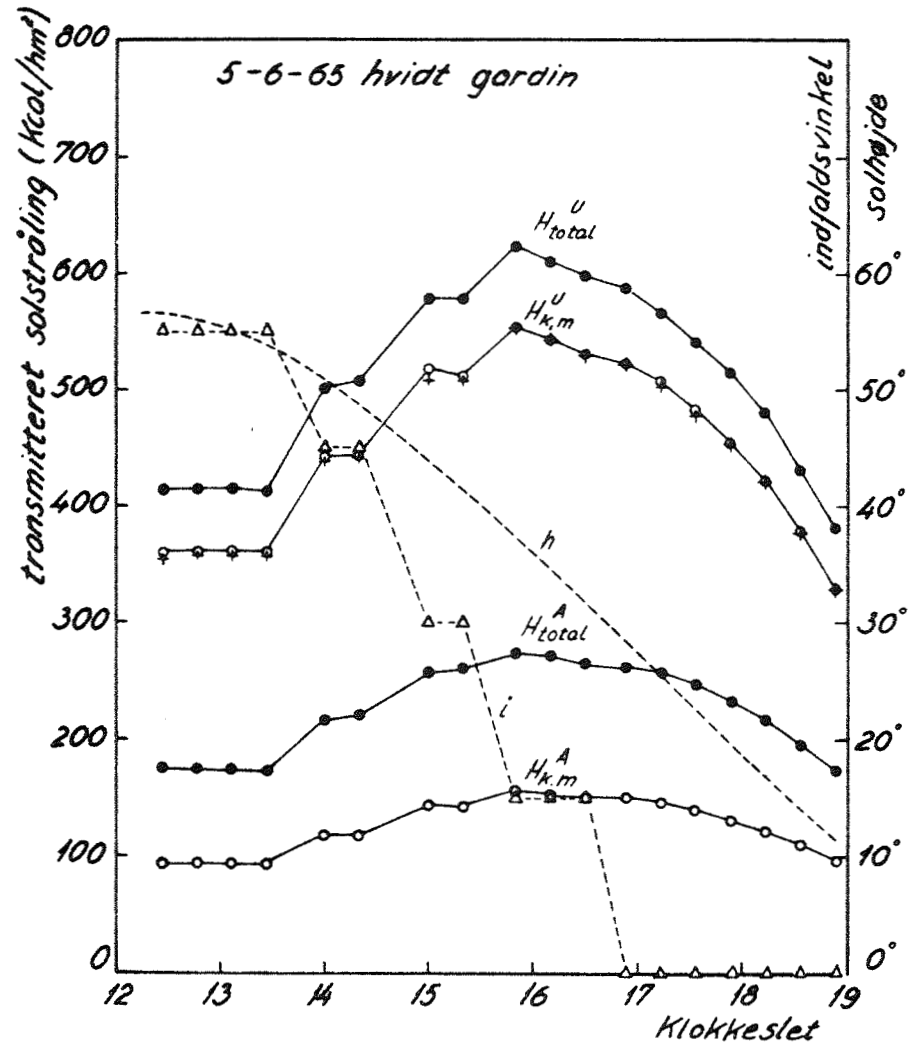


Fig. 34. Måleresultater for hvidt gardin bag en dobbeltrude.  
Results found by measuring for white curtain behind a double pane.

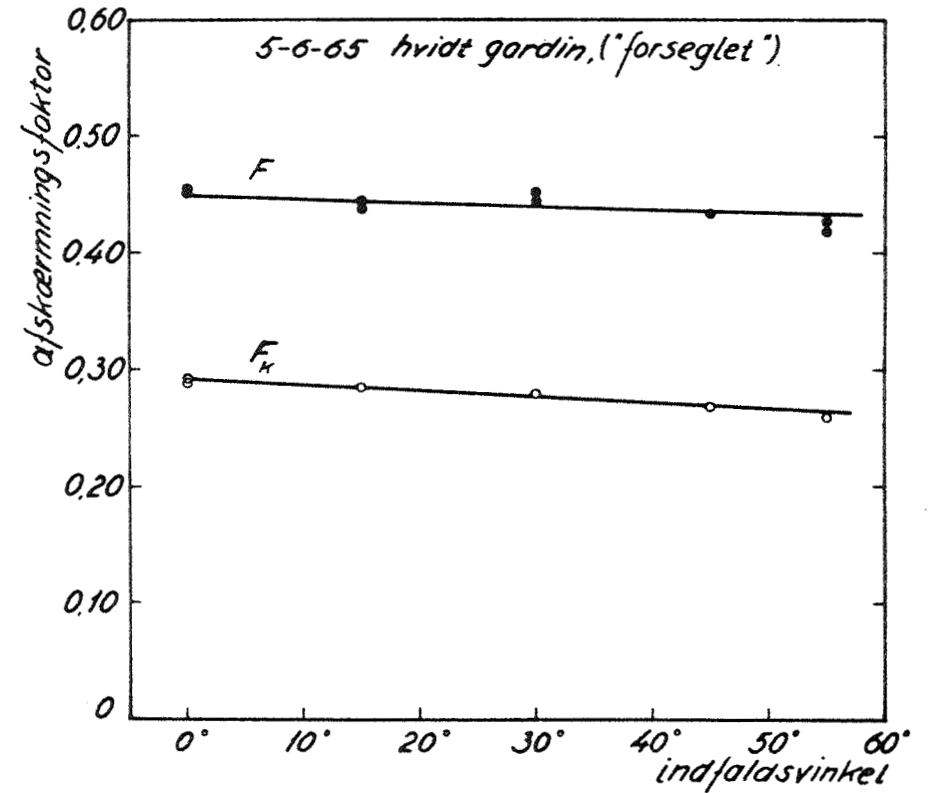


Fig. 35. Afskærmningsfaktor for hvidt gardin bag en dobbelt rude.  
Shade factor for white curtain behind a double pane. (Sealed curtain).

fig. 34 - fig. 37. Det ses, at afskærmningsfaktoren ikke varierer meget med indfaldsvinklen (profilvinklen). Målinger med indfaldsvinkler, hvis projektion på en vandret plan er forskellig fra 0, er ikke foretaget.

Der er god overensstemmelse mellem de to dages måleresultater. Ved målingerne den 6-6 var stationær tilstand ikke nået i de enkelte måleintervaller på grund af de hurtige ændringer af indfaldsvinklen og dermed ændringer af den indfaldende strålingsintensitet. I praksis er intensiteten af den transmitterede solstråling heller ikke stationær, men dette forhold har altså ikke større indflydelse på  $F$  i dette tilfælde.

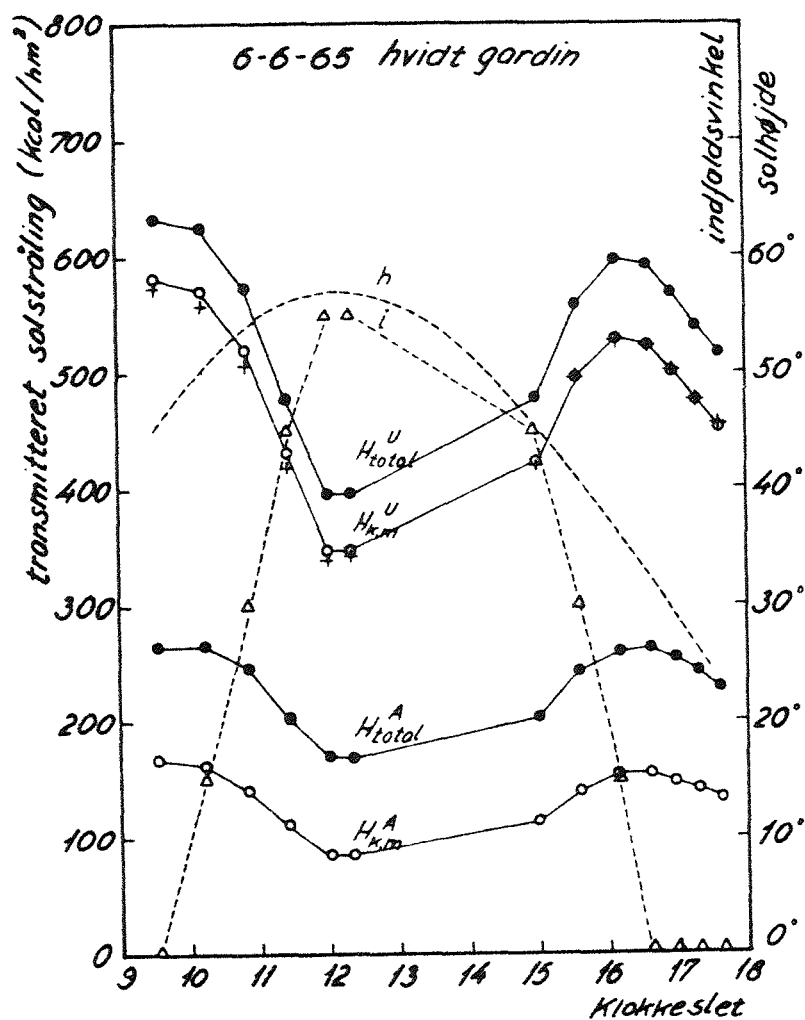


Fig. 36. Måleresultater for hvidt gardin bag en dobbelt rude.  
Results found by measuring for white curtain behind a double pane.

Sammenlignes  $F$  for de to forskellige placeringer af gardinet, ses det tydeligt, at afskærmningen forbedres betydeligt, hvis man ned-sætter den naturlige ventilation af rummet mellem glas og gardin.

Transmissionen af den diffuse stråling er ikke målt. For total-strålingen fandt vi, at  $F$  var næsten uafhængig af indfaldsvinklen,

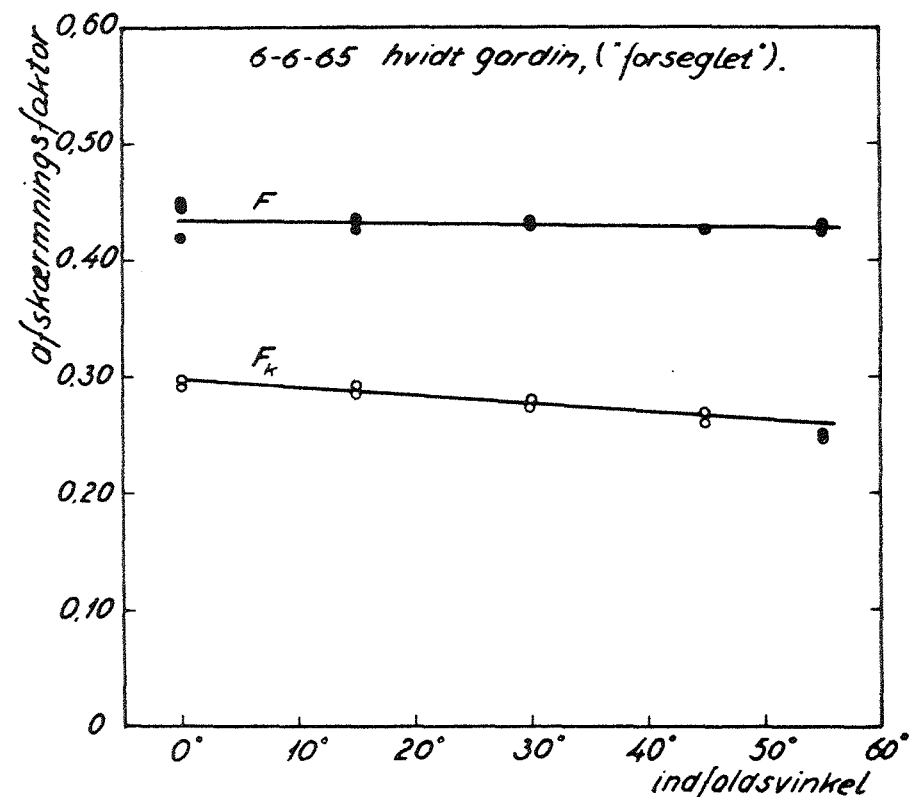


Fig. 37. Afskærmningsfaktor for hvidt gardin bag en dobbelt rude.  
Shade factor for white curtain behind a double pane.

hvoraf man da vil slutte, at  $F_d = F$ . Ved målingerne her har vi imid-lertid kun målt med indfaldsvinklen beliggende i den lodrette normal-plan, og andre målinger\* har vist, at  $F$  er afhængig af azimuthvinklen mellem solen og vinduet, d.v.s. der kan være en forskel mellem  $F$  og  $F_d$ .

I U.S.A. har man foretaget tilsvarende målinger på gardiner af forskellig art med refleksionskoefficienter mellem 0,15 og 0,60, ab-sorptionskoefficienter mellem 0,02 og 0,85 og transmissionskoeffici-enter mellem 0 og 0,70. Man fandt her, at transmissionen af den dif-fuse solstråling gennem et gardin (uden glas), der var foldet 100%, var 20% mindre end for et glat gardin. For gardiner med transmissi-

\* [12]

onskoefficienter på 0,2 til 0,5 fandt man desuden, at transmissionen af den direkte stråling var næsten den samme for det foldede som for det glatte gardin ved indfaldsvinklen 0, mens den var 20% mindre ved en indfaldsvinkel på 45°. Man fandt endvidere, at refleksionen fra det foldede gardin var 15-20% mindre ved indfaldsvinklen 0°, og 5-10% mindre ved indfaldsvinklen 45° end for det glatte gardin.

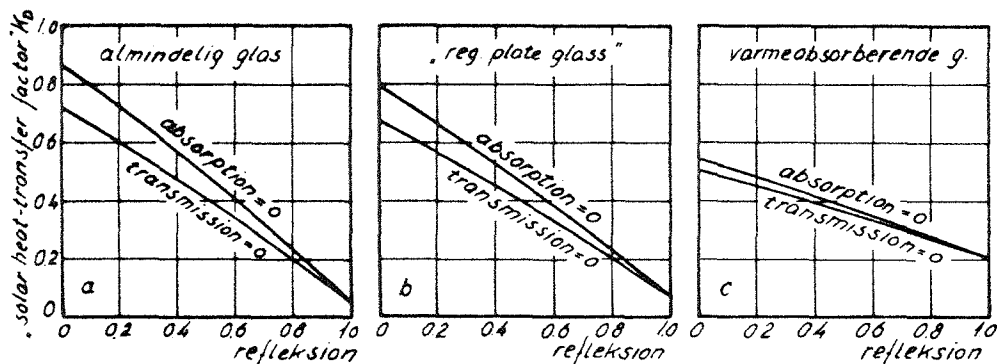


Fig. 38. Faktoren  $K_D$  for foldet gardin bag eet lag glas.  
The factor  $K_D$  for folded curtain behind one glass.

Fig. 38 viser resultatet af den amerikanske undersøgelse [12]. Denne giver et godt billede af de forskellige faktoreres indflydelse på gardinets afskærmende virkning. Den transmitterede stråling har forfatterne til en forandring sammenlignet med den stråling, som rammer vinduet. Forholdet mellem den totale varme, som transmitteres gennem glas og gardin i forhold til den stråling, som rammer vinduet, benævnes "the solar heat transfer factor, K". Refleksions-, transmissions- og absorptionskoefficienterne på fig. 38 gælder for et glat gardin. Vindueskonstruktionen er et lag glas og et frit-hængende gardin med 100% foldning. Det er tydeligt, at det stort set er gardinets reflekterende egenskaber, der er bestemmende for størrelsen af dets afskærmende virkning. Jo mere gardinet samtidig absorberer, des bedre bliver afskærmningen, men des dårligere bliver belysningen i rummet. Ved gardiner med stor refleksionskoefficient er det varmeabsorberende glas dårligere end alm. glas.

Gar man ind i fig. 38a med  $R = 0,65$ , svarende til det gardin, vi har målt på, finder man  $K_D \sim 0,30-0,35$ . Idet transmissionskoeffi-

enten for en alm. dobbeltrude er 0,79, bliver omregningsfaktoren ved omregning fra  $K_D$  til  $F_D \frac{1}{0,79} \approx 1,27$ . Afskærmningsfaktoren  $F_D$  for gardinet bag eet lag glas bliver efter fig. 38 altså 0,38-0,45.

Forsynes vinduet i stedet for med en dobbeltrude, vil den transmitterede stråling gennem glasarealet blive mindre, men samtidig forøges glasarealets transmissionsmodstand, d.v.s. en større del af den varme, som gardinet absorberer, vil forblive i rummet.

For dette tilfælde har vi målt afskærmningsfaktoren til 0,44 ved "forseglet" gardin og 0,55 ved løst gardin.

I reference [13] er foretaget en teoretisk analyse af solindfaldet gennem to lag glas med indvendig afskærmning, og denne er fulgt op med en eksperimentel analyse [14]. Analysen omfatter blandt andet en dobbeltrude af "regular plate glass" (ruden har større absorptionskoefficient end alm. glas) og en dobbeltrude, hvor det udvendige lag glas er varmeabsorberende. Bag ruden sidder et lyst gardin af glasfiber med  $R = 0,39$ ,  $T = 0,35$  og  $A = 0,26$ , altså dårligere reflekterende end det, vi har foretaget målinger på.

Nogle resultater fra den teoretiske og eksperimentelle analyse er vist på fig. 39 og fig. 52, hvor der benyttes afskærmningsfaktoren  $S$  (defineret på side 34). Den refererer til en enkeltrude med en

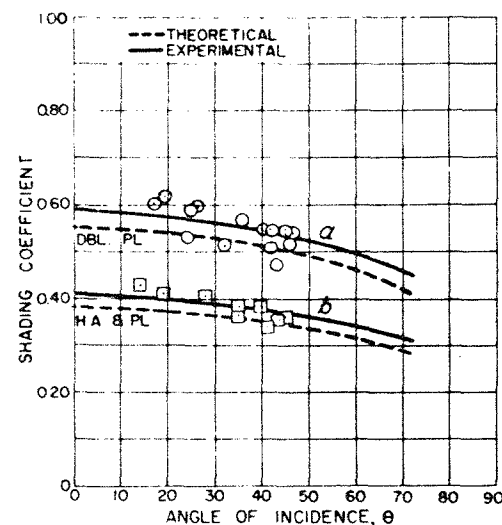


Fig. 39. "Shading coefficient"  $S$  som funktion af indfaldsvinklen for lyst gardin bag a) dobbelt rude, b) varmeabsorberende rude + alm. rude.

"Shading coefficient"  $S$  as a function of the incidence angle for light-coloured curtain behind a) double plate glass, b) heat-absorbing glass + plate glass.

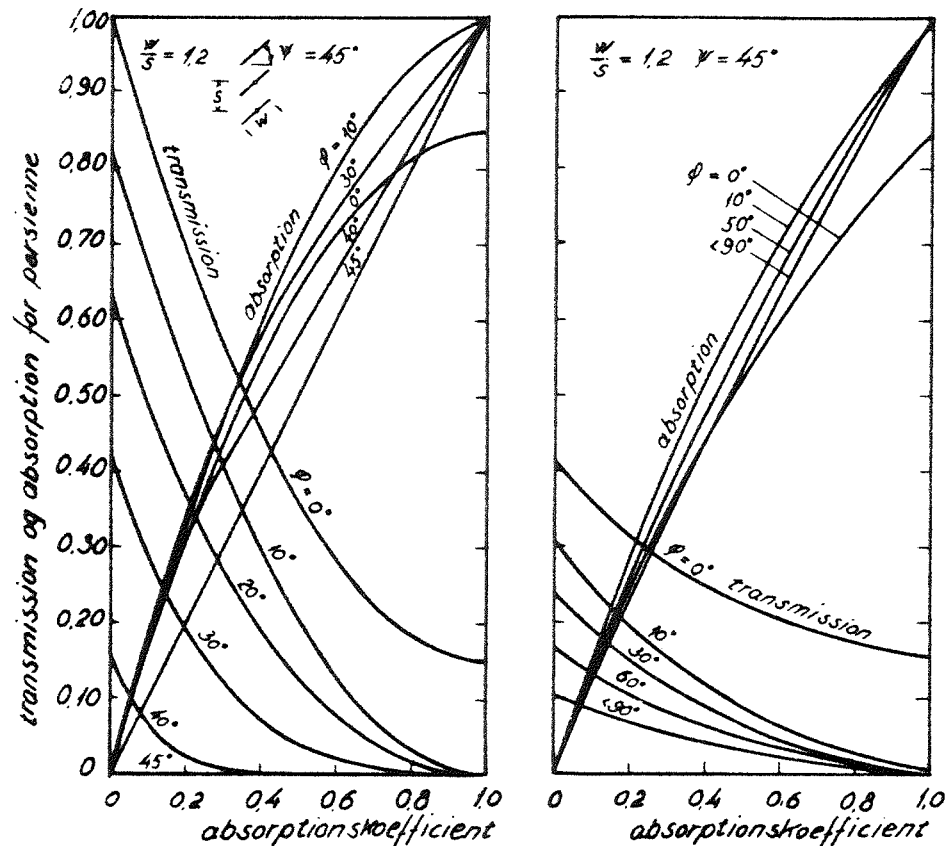


Fig. 40. Transmission og absorption af monokromatisk stråling for persienne med lameloverflade, der er fuldstændig spejlende, som funktion af overfladens absorptionskoefficient.

Transmission and absorption of specular reflecting slats for monochromatic radiation as function of profile angle and slate-surface absorption.

Fig. 41. Transmission og absorption af monokromatisk stråling for persienne med diffus reflekterende lameloverflade som funktion af overfladens absorptionskoefficient.

Transmission and absorption of diffuse reflecting slats for monochromatic radiation as function of profile angle and slate-surface absorption.

transmissionskoefficient på 0,89. Idet F refererer til en dobbelt-rude med transmissionskoefficienten 0,79, bliver omregningsfaktoren ved omregning fra S til F  $\frac{0,89}{0,79} \approx 1,13$ . Ved indfaldsvinklen  $30^\circ$  er  $S = 0,56$  (fig. 39) d.v.s.  $F = 0,56 \cdot 1,13 \approx 0,63$  (som ventet dårligere end det gardin, vi har målt på). Man kan også sammenligne resultatet fra denne analyse med målingerne, som er vist i fig. 38. Går man ind i fig. 38b med  $R = 0,39$  bliver  $K_D \approx 50$ , d.v.s.  $S = 0,50 \cdot \frac{1}{0,89} \approx 0,56$  for gardinet bag et enkelt lag glas. Der er overensstemmelse mellem de to undersøgelser.

### 10.3 Persiener

G.V. Parmelee [15] har udført en teoretisk analyse af transmissionen og refleksionen fra en persienne for monokromatisk stråling under forudsætning af, at lamellerne er plane. Fig. 40 og 41 viser resultatet for en persienne med lamelhældningen  $45^\circ$  og et afstands- og lamelbreddeforhold på 1,2. Fig. 40 gælder for en lameloverflade, der er fuldstændig spejlende, og fig. 41 for en overflade, der giver en fuldstændig diffus refleksion. Det ses, at førstnævnte persienne er bedre end den anden ved store profilvinkler, mens den anden er bedre end den førstnævnte ved små profilvinkler. I praksis har man en overflade, der er en blanding af de to ovennævnte, og transmissionskoefficienten fas da ved interpolation. Da lamellerne er buede, og persiennen samtidig sidder foran eller bag ved et lag glas, vil kurverne ikke umiddelbart kunne benyttes. Fig. 42 viser den analoge beregning, når persiennen rammes af en ensartet diffus stråling fra henholdsvis rummet over normalplanen til persiennen (himmelstrålingen) og rummet under normalplanen (reflekteret stråling fra jordoverfladen). Persiennen yder kun ringe beskyttelse mod refleksstrålingen.

#### 10.3.1 Indvendig persienne

Med solkalorimetret er der udført målinger på en lys (hvid) persienne anbragt 40 mm bag termoruden som vist på fig. 43. Overfladen er blank således at refleksionen, dels er retningsbestemt, og dels er diffus. Ved måling med solarimetret er reflektionskoefficienten for den helt lukkede persienne bestemt til 0,57. Forholdet mellem lamelbredde og lamelafstand er 1,14.

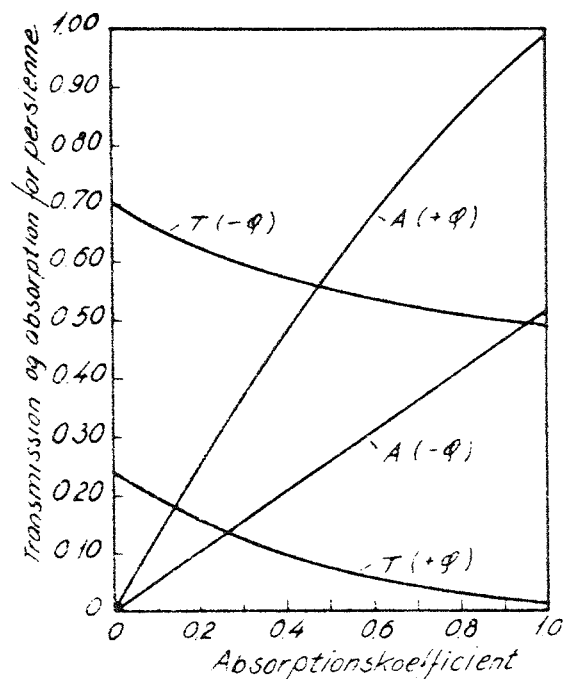


Fig. 52. Transmission og absorption af diffus solstråling for lodret persienne med lamelhældningen  $45^\circ$  som funktion af overfladens absorptionskoefficient (både for himmelstråling (+) og refleksstråling fra jordoverfladen (-)).

Transmission and absorption of diffuse solar radiation for vertical Venetian blind as function of slat surface absorption for  $45^\circ$ -deg slat angle (for both sky (+) and ground-reflected (-) diffuse sources).

Målingerne den 18-7 og 19-7, hvor lamelhældningen var  $45^\circ$ , blev foretaget ved skyfri himmel og med vindhastigheder mindre end 1 m sek. Den 20-7, hvor persiennen var helt lukket, var der enkelte små skyer og lidt dis. Resultatet af målingerne er afbildet på fig. 55-59.

Ved målingen den 18-7, hvor spredningen på F er lille, fulgte kalorimetret solhøjden på en sådan måde, at dets hældning med lodret

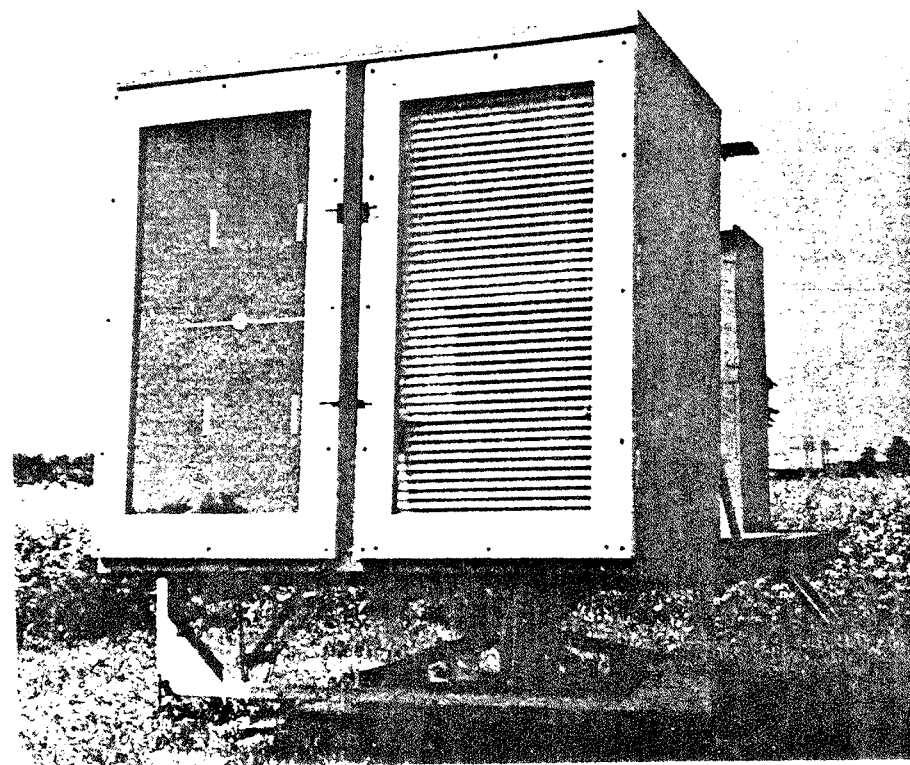


Fig. 53. Solkalorimetret med indvendig persienne.  
Solar-calorimeter with indoor Venetian blind.

ikke blev større end  $10^\circ$ - $15^\circ$ . Ved målingen den 19-7 varierede kalorimetrets hældning en del mere, hvilket antageligt har forårsaget den større spredning på F. Ved større hældninger af kalorimetret vil den naturlige konvektion omkring persiennen blive nedsat.

Sammenlignes persiennens og gardinets afskærmningsfaktorer, ses det, at gardinet er væsentlig bedre. Desuden iagttager man, at den forøgede varmetilførsel, i tilfældet med persiennen, oven i købet sker ved langbølget stråling og konvektion.

Den 16-8 er transmissionen af den diffuse stråling for en persienne med lamelhældningen  $45^\circ$ , målt ved vekslende skydekke og svag vind, (0,5 m sek).



Fig. 44. Måleresultater for indvendig lys persienne bag en dobbelttrude.  
Results found by measuring for indoor light-coloured Venetian blind behind a double pane.

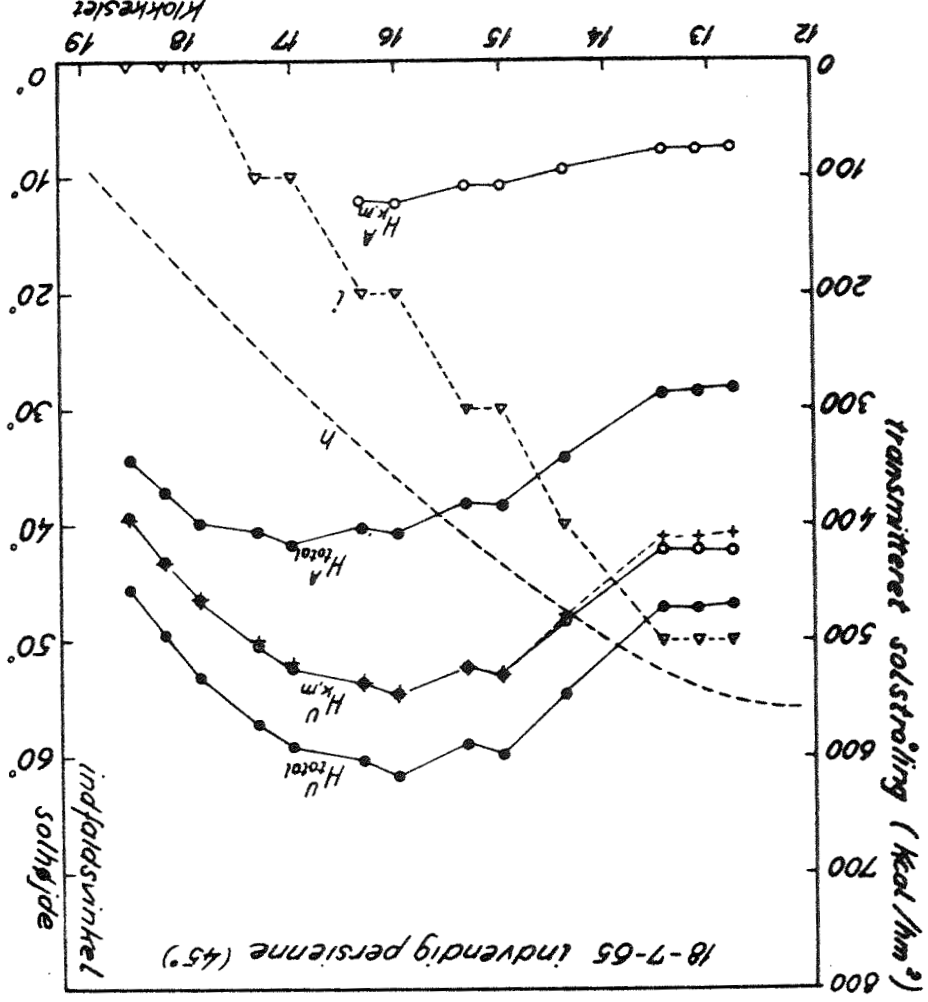
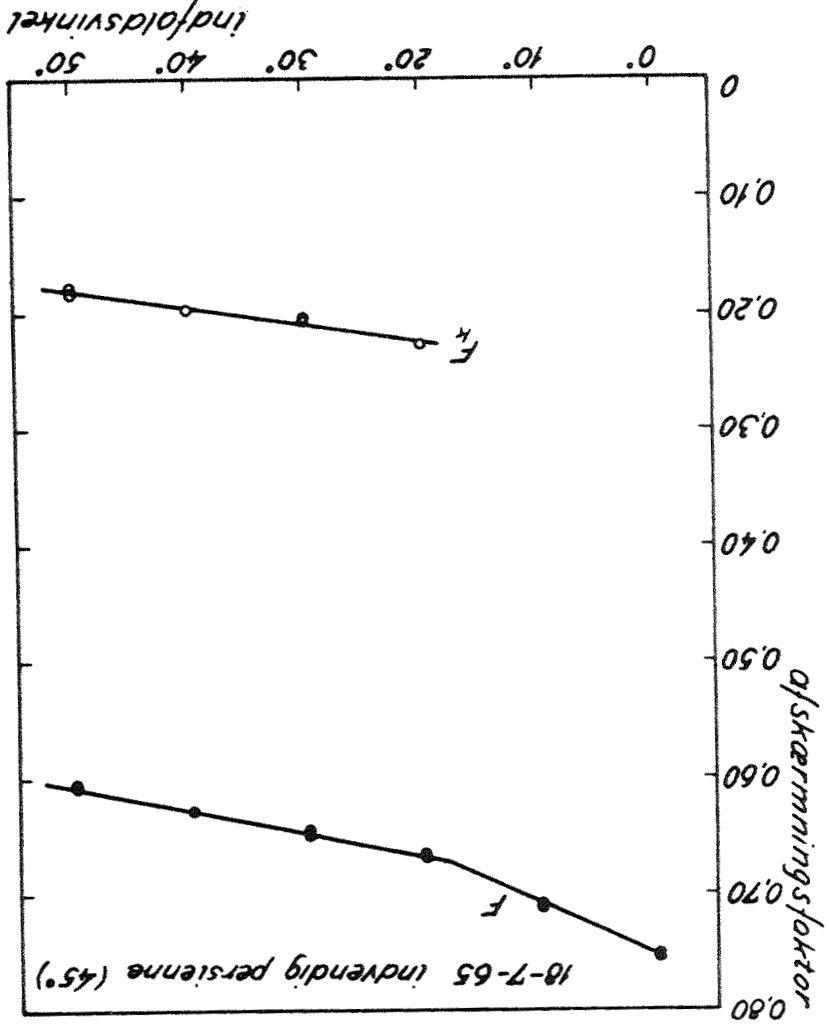


Fig. 45. Afskærmningsfaktoren for indvendig lys persienne bag en dobbelttrude som funktion af profilvinklen.  
Shade factor for indoor light-coloured Venetian blind behind a double pane as function of the profile-angle.



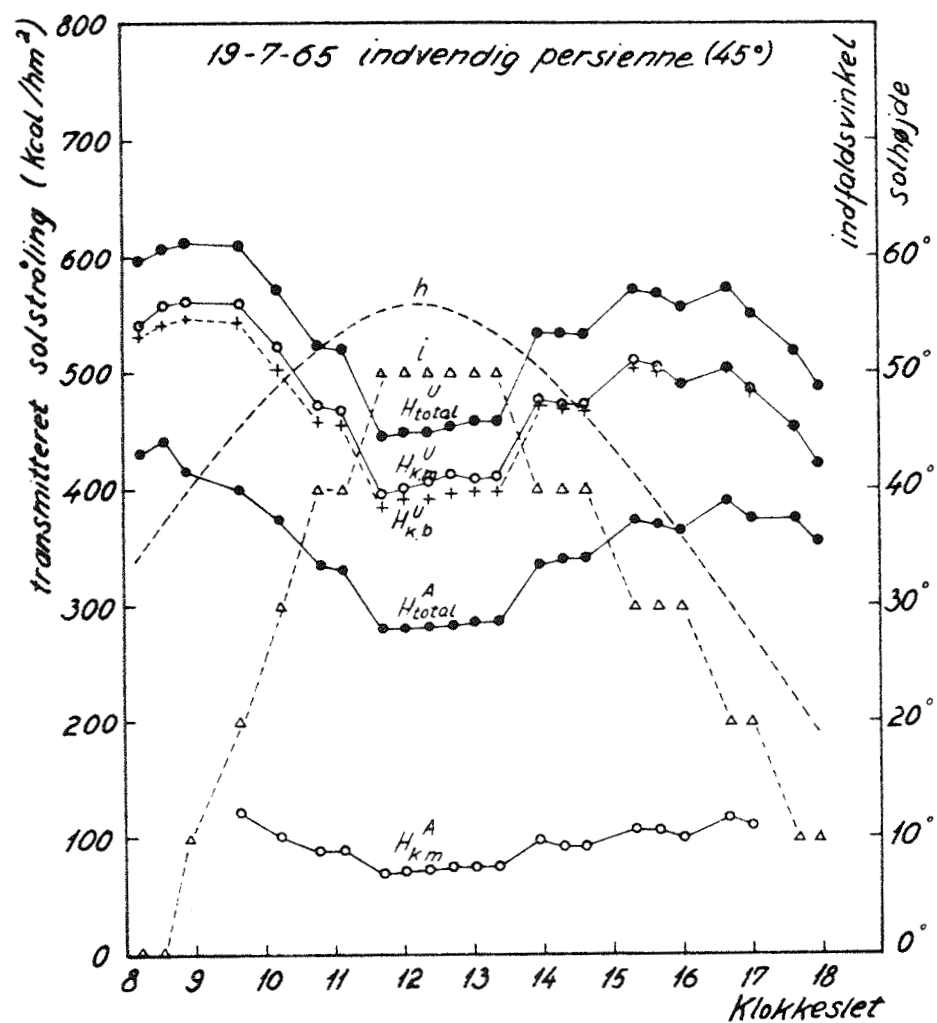


Fig. 46. Maleresultater for indvendig lys persienne bag en dobbeltrude.  
Results found by measuring for indoor light-coloured Venetian blind behind a double pane.

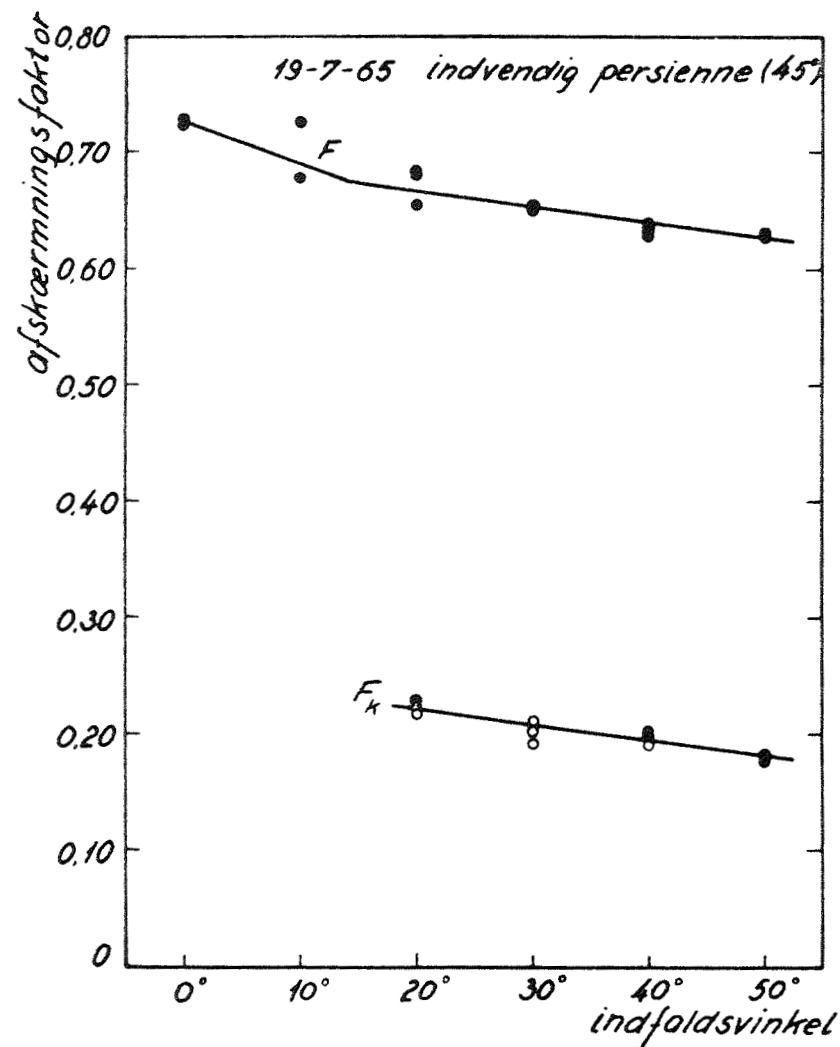


Fig. 47. Afskærmningsfaktoren for indvendig lys persienne bag en dobbeltrude som funktion af profilvinklen.

Shade factor for indoor light-coloured Venetian blind behind a double pane as function of the profile-angle.

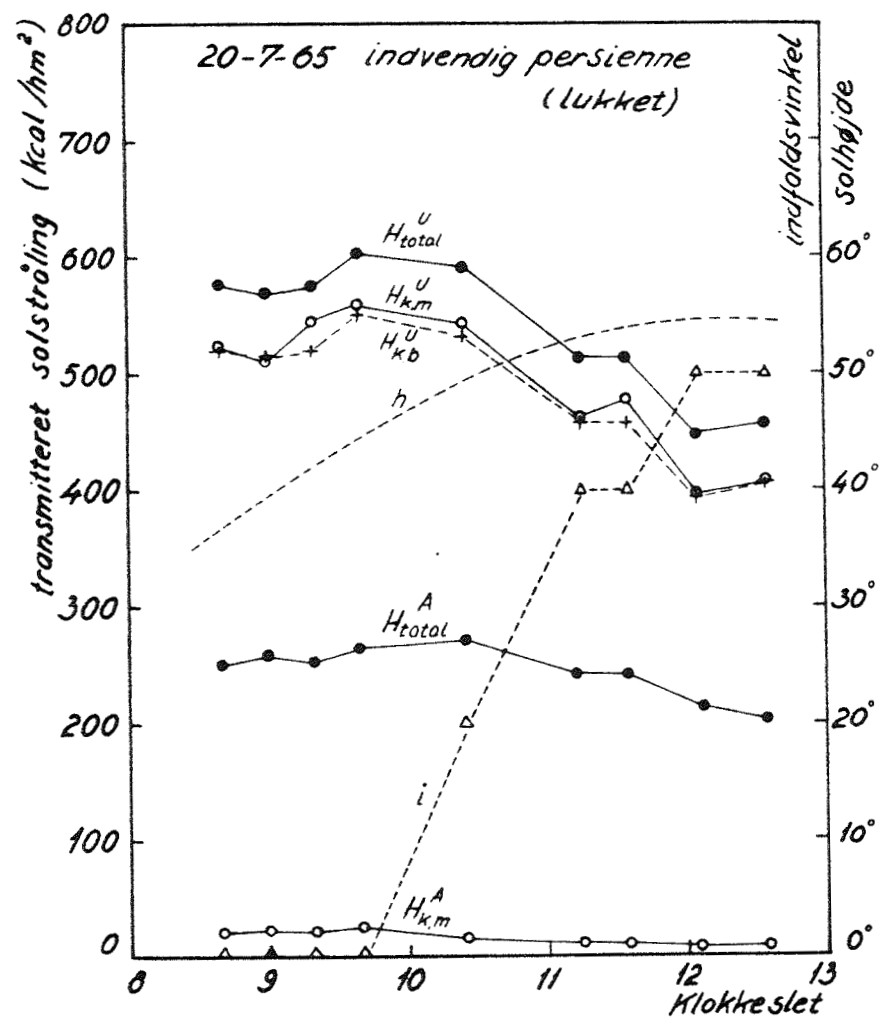


Fig. 48. Måleresultater for indvendig lys persienne, helt lukket.  
Results found by measuring for indoor light-coloured Venetian blind, quite closed.

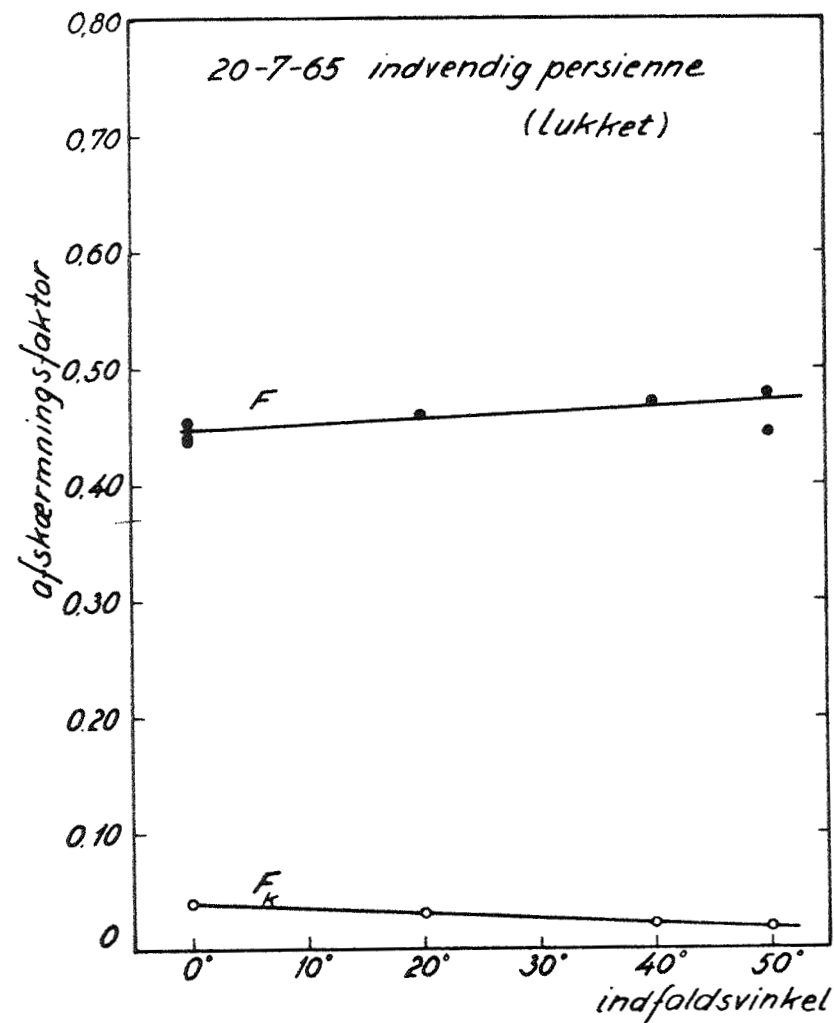


Fig. 49. Afskærmningsfaktor for indvendig lys persienne, helt lukket som funktion af profilvinklen.

Shade factor for indoor light-coloured Venetian blind, quite closed, as function of the profile-angle.

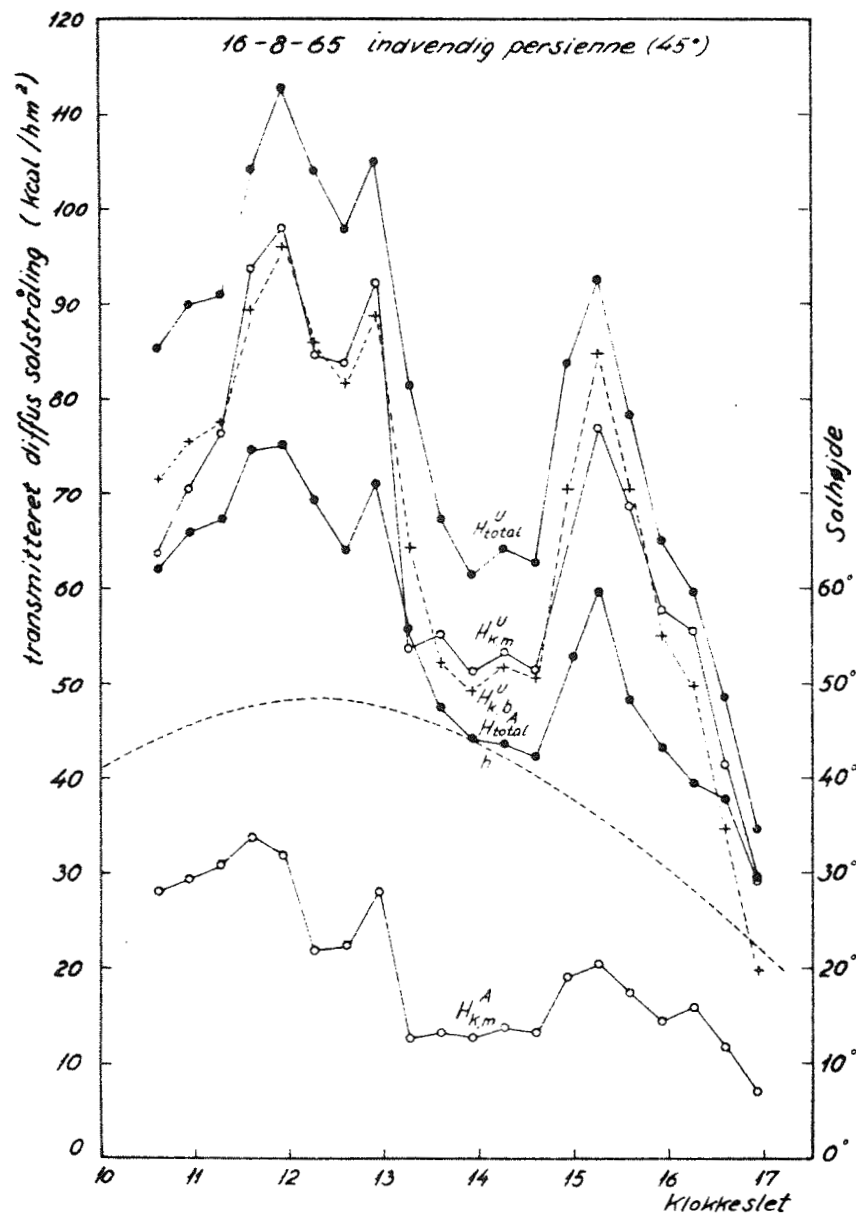


Fig. 50. Måleresultater for indvendig lys persienne med lamelheldningen 45°, ved diffus solstråling.

Results found by measuring for indoor light-coloured Venetian blind for 45-deg slot angle by diffuse solar radiation.

På grund af det vekslende skydække er intensiteten meget svingende, idet refleksstrålingen fra mark og omgivelser nedsættes betydeligt, når solen forsvinder bag en sky. Da persiennens afskærmende virkning er betydelig ringere for den reflekterede stråling end for himmelstrålingen, skulle man vente, at  $F_d$  aftog, når solen forsvandt bag en sky. Dette ræsonnement stemmer ikke overens med resultaterne

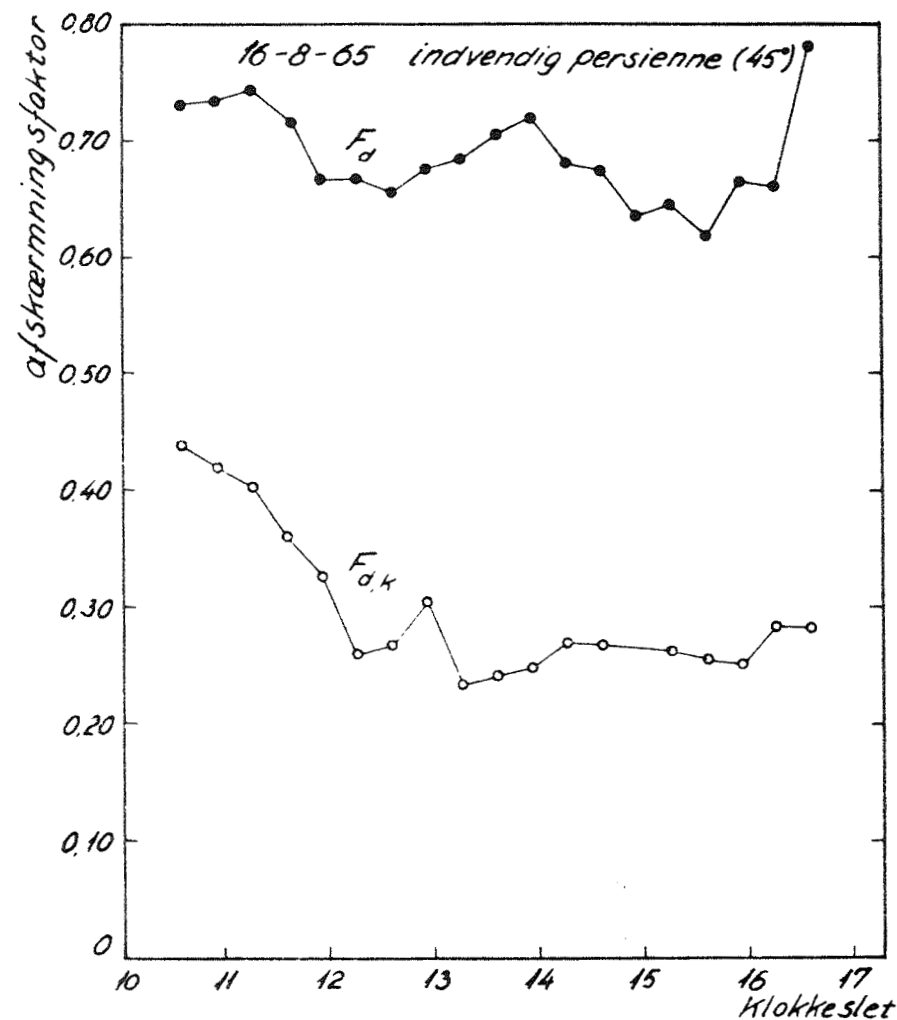


Fig. 51. Afskærmningsfaktor for indvendig lys persienne, 45°, for diffus solstråling.

Shade factor for indoor light-coloured Venetian blind, 45-deg slot angle, for diffuse solar radiation.

på fig. 51. Årsagen skyldes måske de meget instationære tilstande. Nogle flere målinger med konstant solintensitet var ønskelig.

Da  $F$  og  $F_d$  er næsten lige store, er en adskillelse af  $F$  efter formelen 9.3.5 underordnet. Forholdene vedrørende transmissionen af diffus stråling er grundigere behandlet i afsnittet om udvendig persienne.

Persiennens afskærmende virkning forbedres betydeligt, når den lukkes helt, men som det ses på fig. 48, er det den kortbølgede stråling, der formindskes. Betragter man afskærmningsfaktoren  $F$  på fig. 49, ser man, at denne tilsyneladende stiger med voksende profilvinkel. Årsagen er antagelig, at konvektionen omkring persiennen ned-sættes, når kalorimeterkassen er skrå.

Sammenlignes den målte afskærmningsfaktor  $F$  for persiennen med lamelhældningen  $45^\circ$  og den afskærmningsfaktor  $S$ , der er bestemt ved U.S.A målingerne, er der god overensstemmelse, når man erindrer, at  $F = 1,13 \cdot S$ . Ved profilvinklen  $30^\circ$  har vi således målt  $F = 0,65$ , og af fig. 52 finder man  $F = 1,13 \cdot S = 1,13 \cdot 0,55 = 0,62$ .

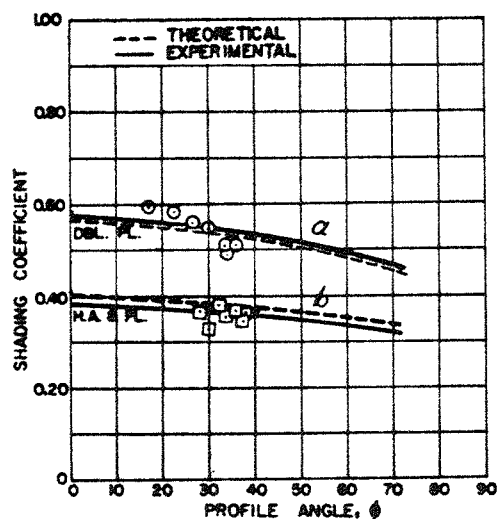


Fig. 52. "Shading coefficient"  $S$  som funktion af profilvinklen for lys persienne bag a) dobbelt rude, b) varmeabsorberende glas + alm. glas.

"Shading coefficient"  $S$  as function of the profile angle for light-coloured Venetian blind behind a) double plate glass, b) heat-absorbing glass + plate glass.

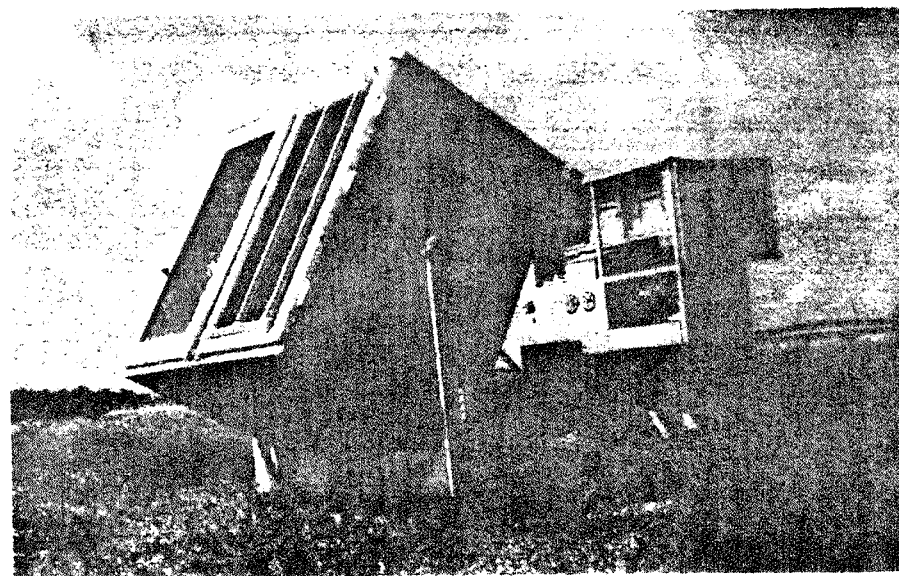


Fig. 53. Solkalorimeter med udvendig persienne. Solar-calorimeter with outdoor Venetian blind.

### 10.3.2 Udvendig persienne

Den udvendige persienne, der har stilbare lameller, er placeret 60 mm foran termoruden som vist på fig. 53. Lamellerne er sølvgrå, og refleksionen af den indfaldende stråling er temmelig retningsbestemt. Med solarimetret er refleksionskoefficienten for den helt lukkede persienne målt til 0,50. Forholdet mellem lamelbredde og lamelafstand er 1,2.

Transmissionen af totalstrålingen er målt den 12-8 og 13-8 ved skyfri himmel og svag vind, 1 m sek. Transmissionen af den diffuse stråling alene er målt den 3-8 ved vekslende skydække og næsten vindstille. Resultaterne er vist på fig. 54-59.

Der foreligger kun en enkelt dags målinger med solkalorimetret af transmissionen af den diffuse stråling, og disse er ikke velegnede til beregningen af  $F_d$  og  $F_D$ . Da disse målinger imidlertid giver et fingerpeg om betydningen af at skelne mellem diffus og direkte stråling, gennemføres beregningen her. Vanskeligheden ved bestemmelse af den diffuse stråling skal ligeledes nøjere belyses.

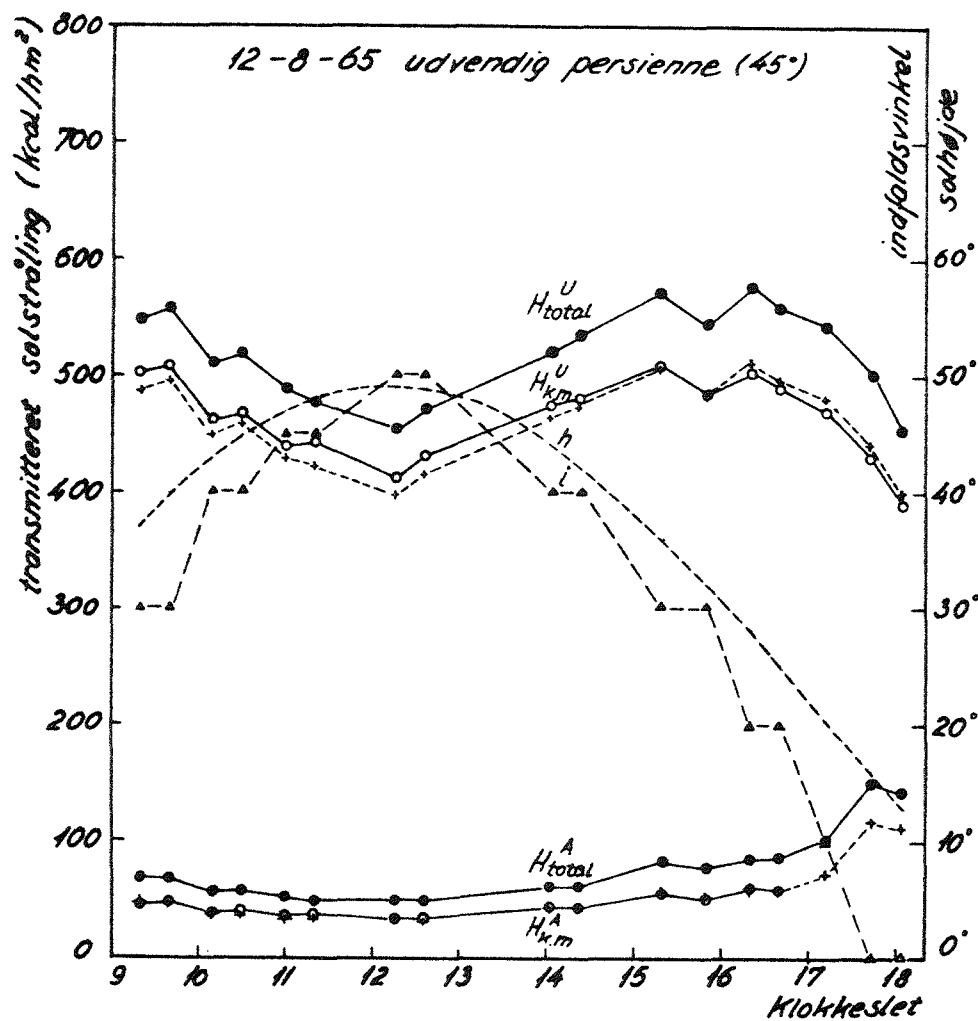


Fig. 54. Måleresultater for udvendig persienne med lamelhældning 45°. Results found by measuring for outdoor Venetian blind for 45-deg slat angle.

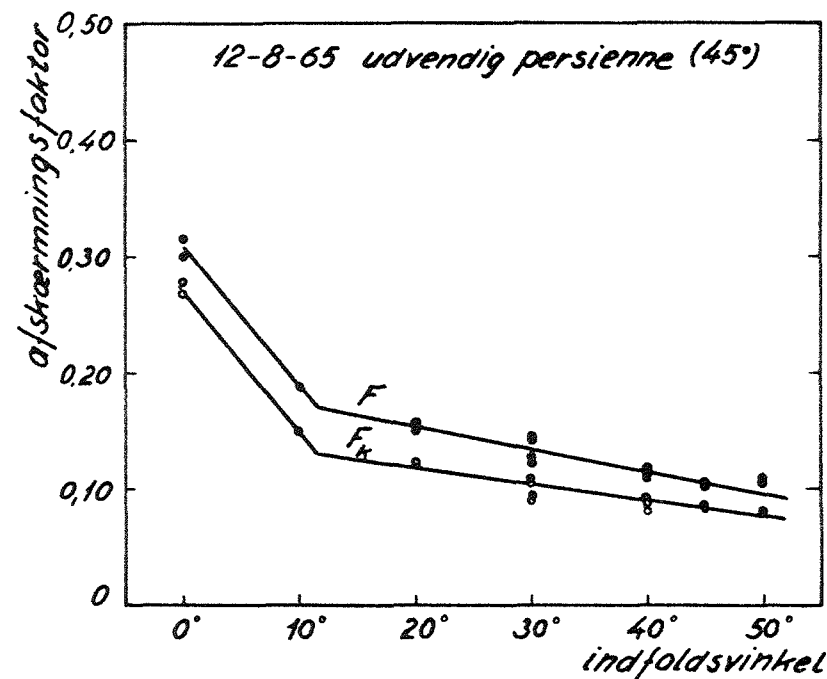


Fig. 55. Afskærmningsfaktor for udvendig persienne med lamelhældningen 45° som funktion af profilvinklen.

Shade factor for outdoor Venetian blind for 45-deg slat angle as function of the profile-angle.

Da transmissionskoefficienten for den diffuse stråling, som tidligere beskrevet, er forskellig for strålingen fra henholdsvis rummet over og under den vandrette normalplan til den lodrette afskærmning, vil transmissionskoefficienten for den diffuse stråling fra hele halvrummet være bestemt af forholdet mellem intensiteten af strålingen for de respektive halvdele af halvrummet. På fig. 60 er beregnet transmissionskoefficienten for diffus stråling for en persienne med lamelhældningen 45° og en overflade med absorptionskoefficienten  $A$ , som funktion af forholdet mellem intensiteten af den diffuse stråling under og over normalplanen. Ved beregningen er benyttet transmissionskoefficienterne fra fig. 42.

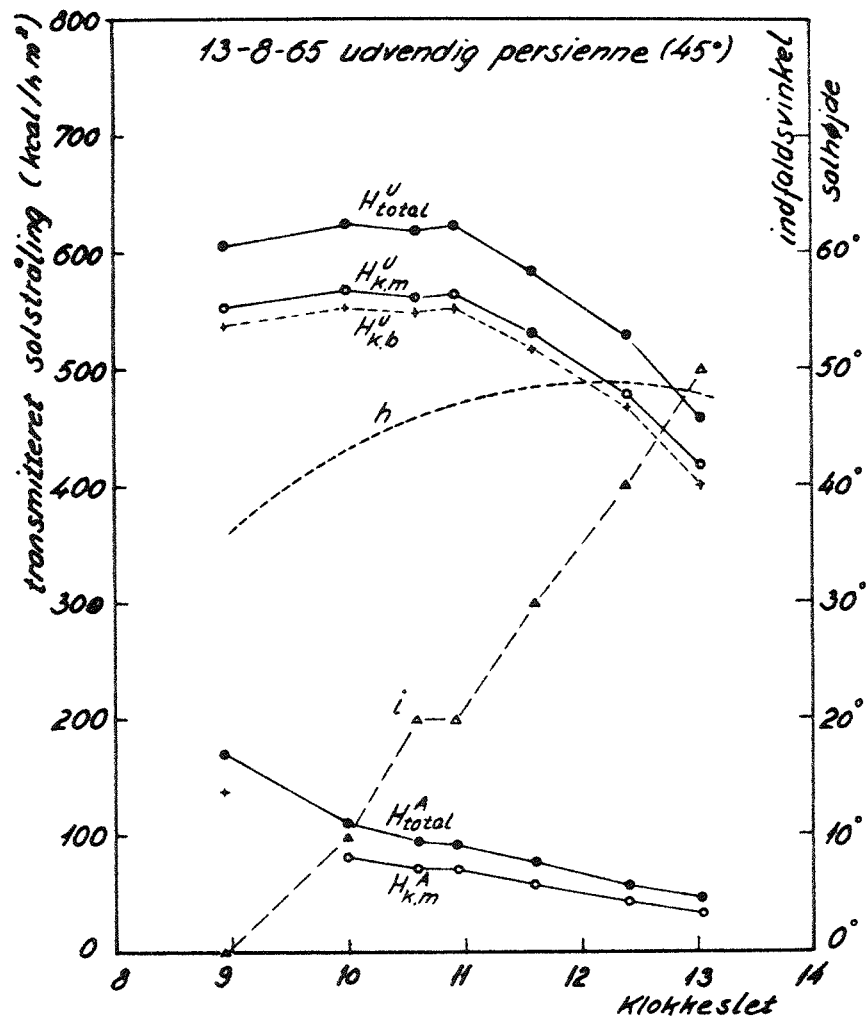


Fig. 56. Måleresultater for udvendig persienne med lamelhældning 45°. Results found by measuring for outdoor Venetian blind for 45-deg slat angle.

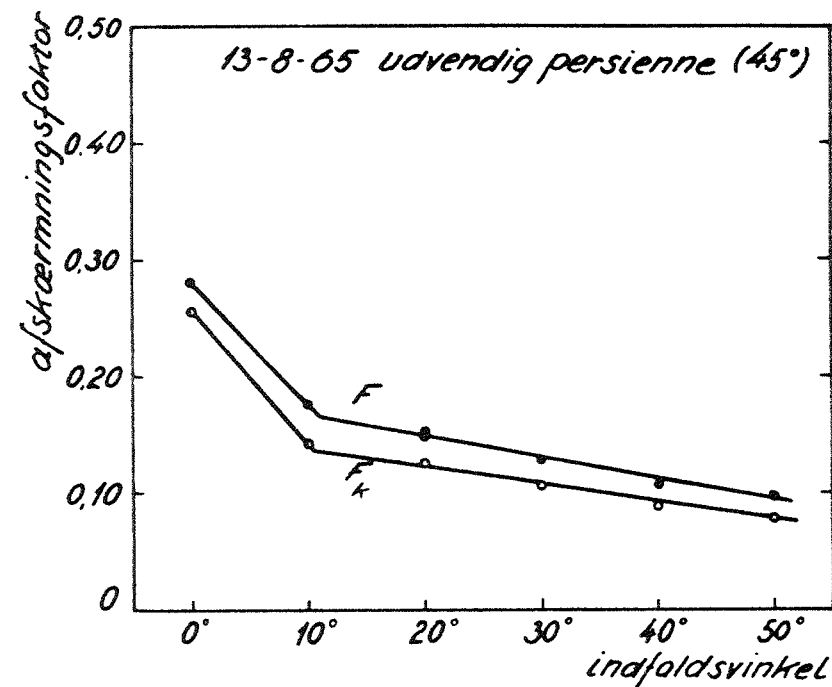


Fig. 57. Afskærmningsfaktor for udvendig persienne med lamelhældning 45° som funktion af profilvinklen.

Shade factor for outdoor Venetian blind for 45-deg slat angle as function of the profile-angle.

Når man skal måle afskærmningsfaktoren  $F_d$  for den diffuse stråling, er man nødt til at dreje ruden væk fra solen. Sammensætningen af den diffuse stråling, som rammer vinduet, er imidlertid ikke længere den samme, som når vinduet er vendt mod solen.

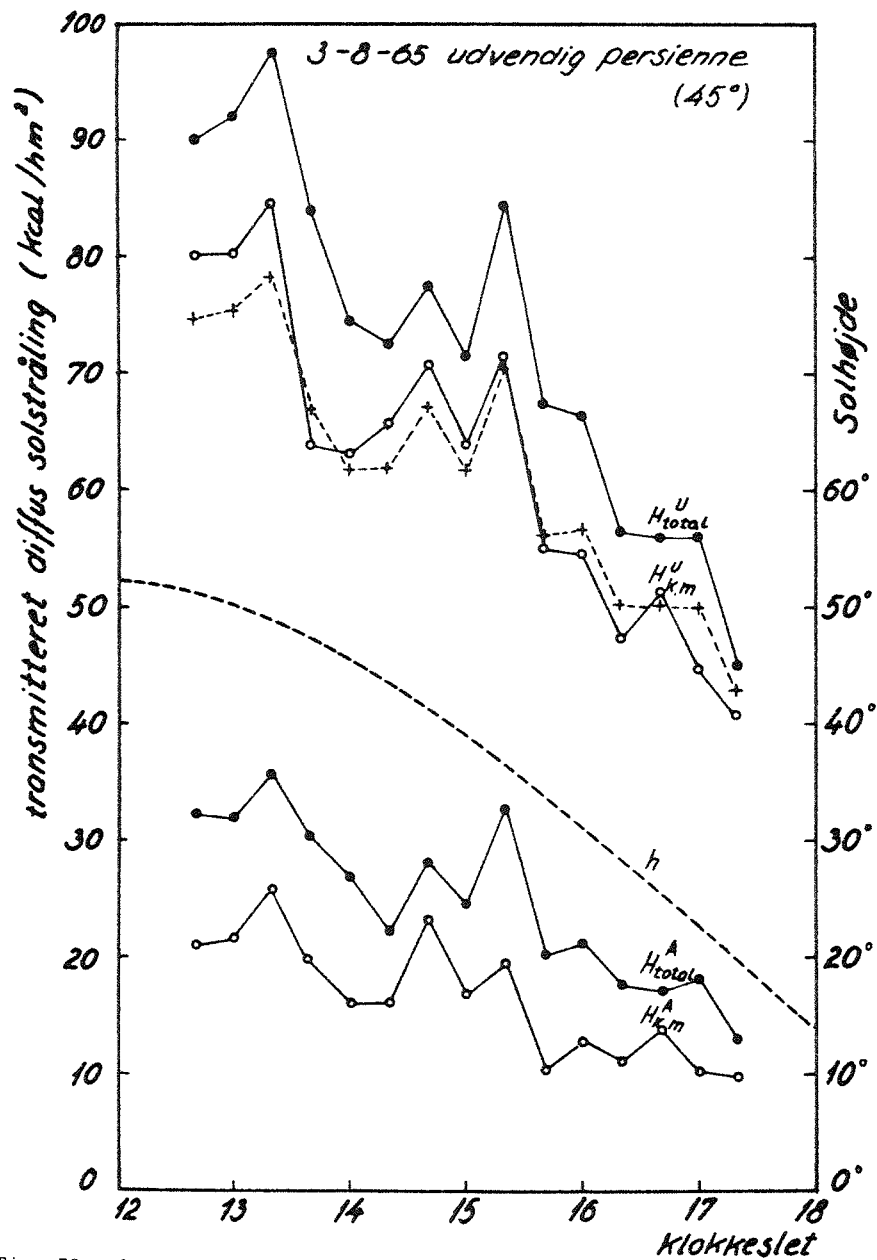


Fig. 58. Måleresultater for udvendig persienne med lamelhældningen 45° ved diffus solstråling.

Results found by measuring for outdoor Venetian blind for 45-deg slat angle by diffuse solar radiation.

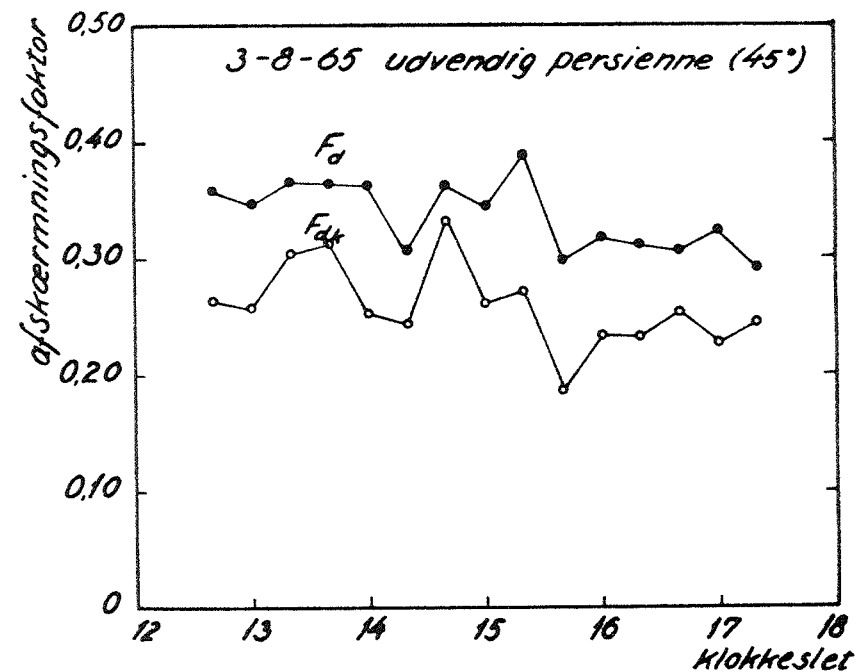


Fig. 59. Afskærmningsfaktor for udvendig persienne med lamelhældningen 45° for diffus solstråling.

Shade factor for outdoor Venetian blind for 45-deg slat angle for diffuse solar radiation.

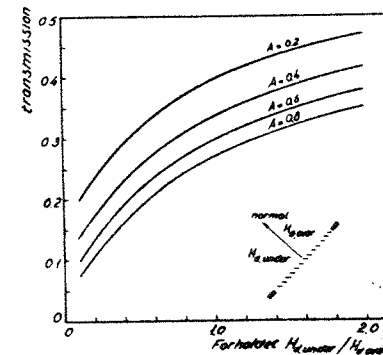


Fig. 60. Transmission af diffus stråling gennem persienne med lamelhældningen 45°, som funktion af forholdet mellem intensiteten af den diffuse stråling under og over normalplanen.

Diffuse radiation transmission through Venetian blind for 45-deg slat angle as a function of the relationship between the intensity of the diffuse radiation below and above the normal plane.



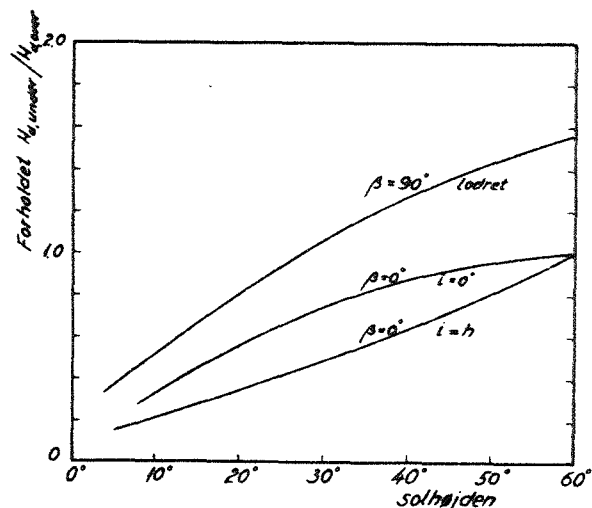


Fig. 61. Forholdet mellem den diffuse stråling fra rummet under og over vinduets normalplan som funktion af solhøjden.

The relationship between the diffuse radiation from the space below and above the normal plane of window as function of the altitude angle of the sun.

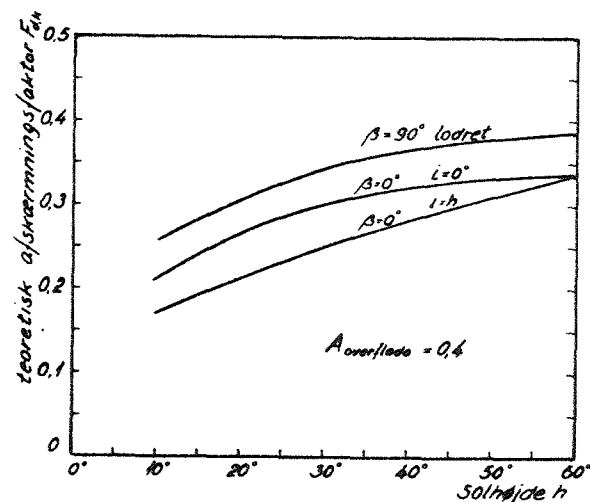


Fig. 62. Teoretisk værdi for afskærmningsfaktoren  $F_{d,k}$  for udvendig persienne med absorptionskoefficienten 0,4, som funktion af solhøjden.

Theoretical value for the shading factor for short-wave diffuse radiation for outdoor Venetian blind with the absorption coefficient 0,4, as function of the altitude angle of the sun.

På fig. 61 er beregnet forholdet mellem intensiteten af den diffuse stråling, som rammer vinduet under og over normalplanen for tre tilfælde, nemlig lodret flade med azimuthvinklen  $\beta$  til solen lig  $0^\circ$ , lodret flade med  $\beta = 90^\circ$  og endelig en skrå flade vinkelret på solstrålingen, d.v.s.  $\beta = 0^\circ$  og indfaldsvinklen  $i = 0^\circ$ . Forudsætningerne er, at intensiteten af den direkte og diffuse stråling varierer som beskrevet i afsnit 11, og jordoverfladens reflektionskoefficient er 0,25.

Afskærmningsfaktoren for den diffuse kortbølgede stråling  $F_{d,k}$  for den udvendige persienne kan tilnærmelsesvis sættes lig transmissionskoefficienten for den diffuse stråling for en persienne (fig. 42), idet man ser bort fra refleksionen mellem ruden og persiennen. På fig. 62 er den således teoretiske værdi af transmissionskoefficienten eller  $F_{d,k}$  bestemt for de tre førnævnte tilfælde for en persienne med absorptionskoefficienten 0,4. Det ses tydeligt, at man ved en normal fordeling af strålingen ikke har den samme værdi af  $F_d$ , når afskærmningen vender imod solen, som når den vender bort fra solen.

Når man skal beregne  $F_D$  efter ligning 9.3.5, er det sammenhørende værdier af  $F$  og  $F_d$ , der skal benyttes. Man må derfor først ved målinger med solkalorimetret bestemme  $F_d$  som funktion af forholdet mellem intensiteten af den diffuse stråling fra rummet under og over normalplanen til vinduet med persiennen, når dette er drejet bort fra solen i lighed med fig. 60. Under målingen af totalstrålingen måler man da samtidig (ved hjælp af et solarimeter) forholdet mellem intensiteten af den diffuse stråling fra rummet under og over normalplanen. Den aktuelle værdi af  $F_d$  under målingen af totalstrålingen bestemmes derefter ved hjælp af den førstnævnte måling.

Forsøg, hvor  $F_d$  bestemmes på denne måde, er ikke udført.

På fig. 63 vises et udsnit af skrivestrimlen fra den 3.8, hvor azimuthvinklen mellem vindue og solen er  $90^\circ$ . Man ser, at det især er refleksstrålingen, som varierer, idet den kortbølgede transmitterede stråling formindskes procentvis mest for vinduet med persiennen, når solen forsvinder bag en sky.

Af disse målinger er  $F_{d,k}$  i korte perioder med klar sol bestemt til 0,32 ved solhøjden  $40-50^\circ$ . Da forholdet mellem  $F_{d,k}$  og  $F_d$  er ca. 0,77, kan vi regne med, at  $F_d \cong 0,32 \cdot \frac{1}{0,77} \cong 0,41$  (for  $\beta = 90^\circ$ ).

Forudsættes det, at strålingen er normalt fordelt, kan vi skønne (af fig. 62), at  $F_{d,k} = 0,24$  for  $\beta = 0^\circ$  eller  $F_d \cong 0,31$  for solhøjden  $40-50^\circ$ .

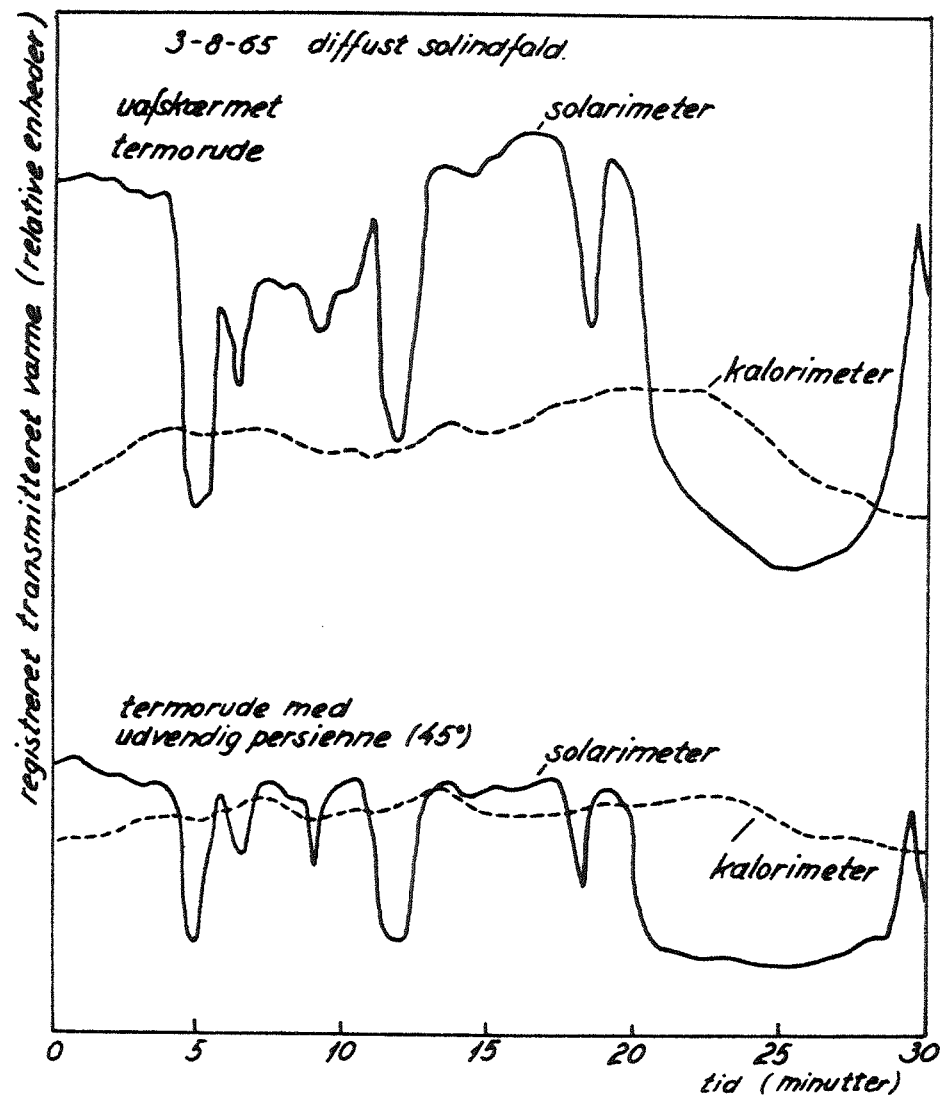


Fig. 63. Eksempel på måling af den transmitterede diffuse stråling gennem en dobbeltrude med udvendig persienne.

Example of measuring of the transmitted diffuse radiation through a double pane with outdoor Venetian blind.

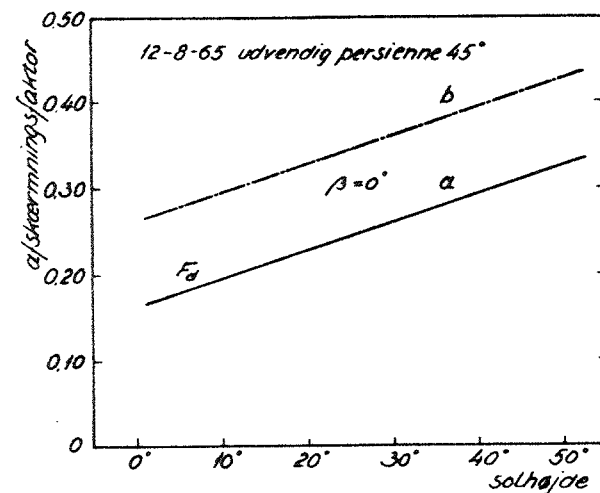


Fig. 64. Afskærmningsfaktoren for diffus stråling for udvendig persienne som funktion af solhøjden. ( $\beta = 0$ )

The shading factor for diffuse radiation for outdoor Venetian blind as function of the altitude angle of the sun. ( $\beta = 0$ )

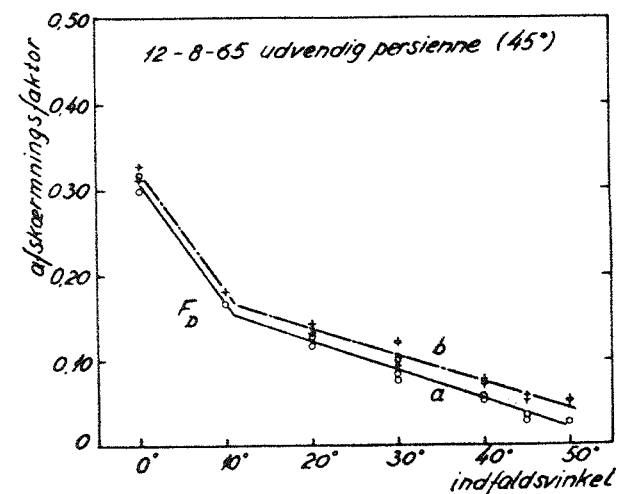


Fig. 65. Afskærmningsfaktoren for direkte stråling for udvendig persienne som funktion af profilvinklen.

The shading factor for direct radiation for outdoor Venetian blind as function of the profile-angle.

På fig. 64 er  $F_d$  tegnet som funktion af solhøjden for  $\beta = 0^\circ$  (kurve a), og fig. 65 viser resultatet af beregningen af afskærmningsfaktoren for den direkte stråling  $F_D$  efter ligning 9.3.5.

Spørgsmålet er nu, hvor stor indflydelse  $F_d$  har på beregningen af størrelsen af  $F_D$ . Tænker vi, at  $F_d$ , for  $\beta = 0^\circ$  og  $h = 45^\circ$ , er 0,41 i stedet for 0,31 (kurve b), fås  $F_D$  som vist på fig. 64, kurve b. Den relative fejl på  $F_D$  bliver stor, men den absolutte fejl på  $F_D$ , d.v.s.  $F_D$ 's størrelse i forhold til 1, bliver knapt et par %. Selv om der er gjort forskellige forudsætninger og tilnærmelser ved beregningen af  $F_D$ , skulle resultatet således alligevel være anvendeligt til praktisk brug. Nogle flere målinger og beregninger efter den tidligere beskrevne metode vil kunne belyse disse forhold nøjere.

## 11. BEREKNING AF SOLINDFALDET PÅ EN VÆG ELLER GENNEM ET VINDUE

### 11.1 Definition på vinkler

Strålingsintensiteten på et fladeelement er afhængig af dets orientering i forhold til solen og jordoverfladen. På fig. 66 er angivet de vinkler, der benyttes til beskrivelse af en flades orientering i forhold til jordoverfladen og solen.

- $\alpha_v$  = væggen's azimuthvinkel
- $\alpha_s$  = solens azimuthvinkel
- $\beta$  = væg-solazimuthvinkel
- $h$  = solhøjde
- $i$  = indfaldsvinkel
- $\varphi$  = profilvinkel
- $\gamma$  = hældningsvinkel

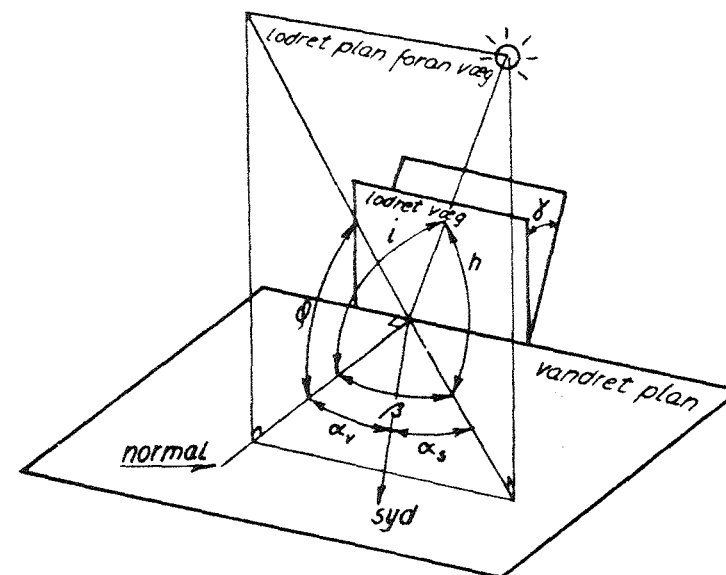


Fig. 66. Definition af vinkler.  
Definitions of angles.

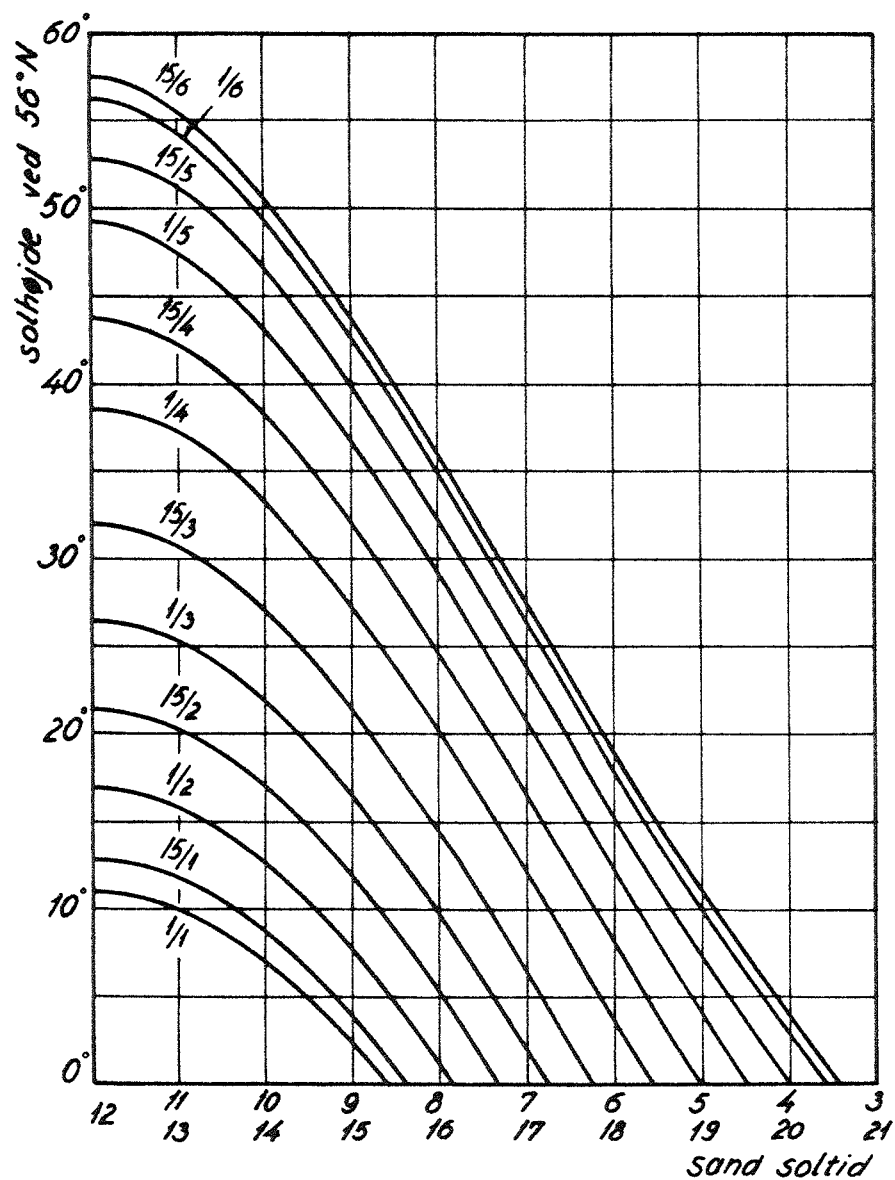


Fig. 67. Solhøjden ved  $56^{\circ}$  n.b. som funktion af dato og klokkeslet.  
The altitude angle of the sun at  $56^{\circ}$  north latitude as function of date and hour.

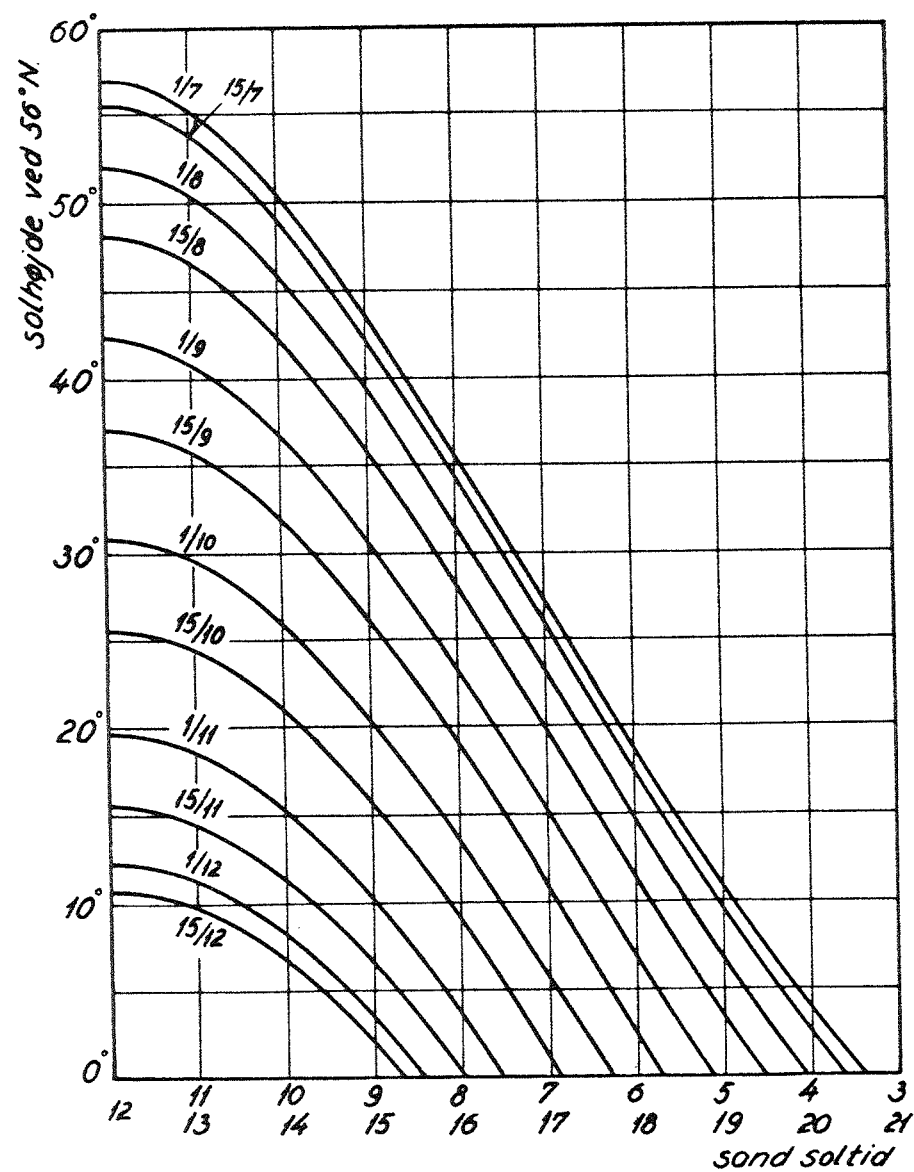


Fig. 68. Solhøjden ved  $56^{\circ}$  n.b. som funktion af dato og klokkeslet.  
The altitude angle of the sun at  $56^{\circ}$  north latitude as function of date and hour.

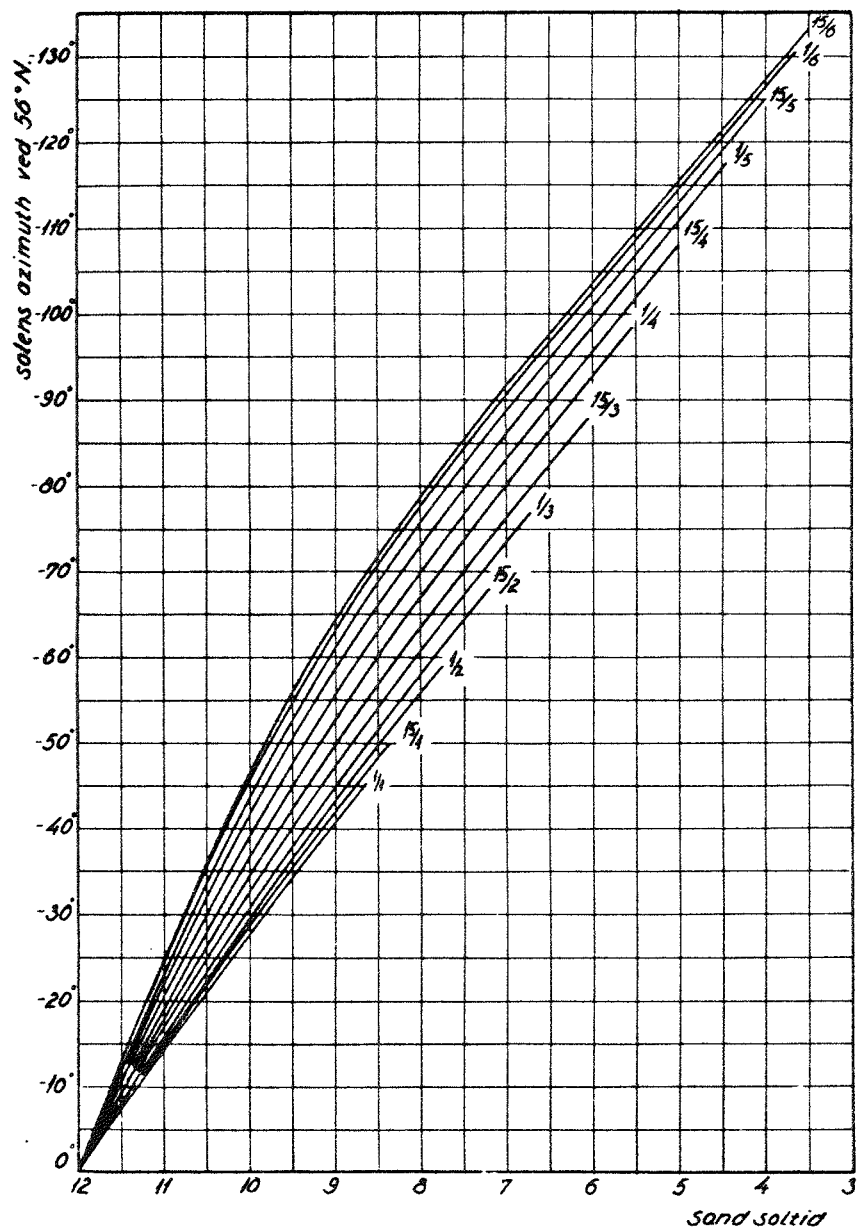


Fig. 69. Solens azimuth ved 56° n.b. som funktion af dato og klokkeslet.  
The azimuth of the sun at 56° north latitude as function of date and hour.

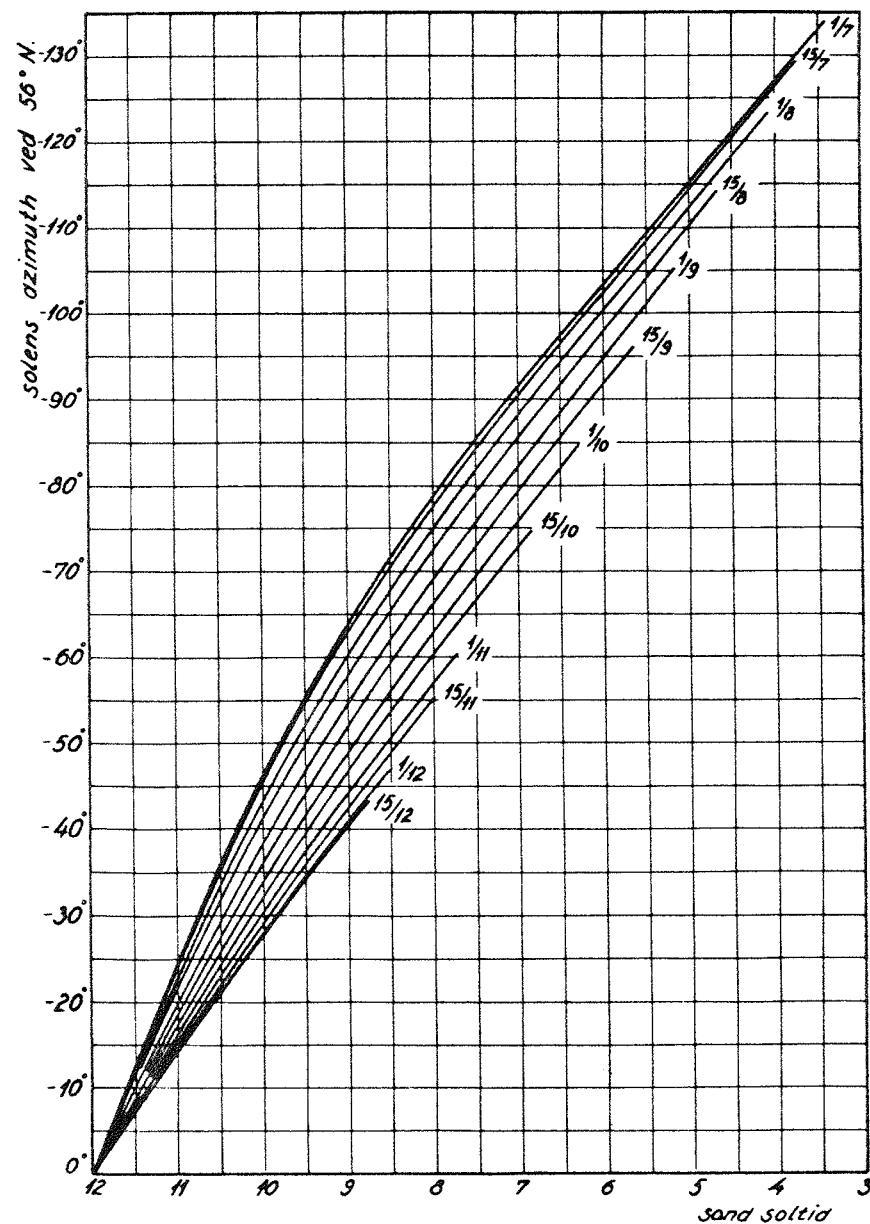


Fig. 70. Solens azimuth ved 56° n.b. som funktion af dato og klokkeslet.  
The azimuth of the sun at 56° north latitude as function of date and hour.

Væggens orientering angives i forhold til syd med azimuthvinklen  $\alpha_v$ , der er vinklen mellem den lodrette normalplan for væggen og den lodrette plan gennem sydretningen.  $\alpha_v$  er 0 imod syd og regnes positiv mod vest og negativ mod øst. Væggens hældning med lodret angives med vinklen  $\gamma$ .

Solens plads på himmelhvælvingen er bestemt af solhøjden  $h$  og azimuthvinklen  $\alpha_s$ , der regnes med fortegn som angivet for  $\alpha_v$ . Solens højde og azimuth er en funktion af klokkeslet, dato og stedets geografiske beliggenhed. På fig. 67, 68, 69, 70 er angivet solhøjde og azimuth for  $56^\circ$  n.b. som funktion af klokkeslet (sand soltid) og dato [16].

Sammenhæng mellem sand soltid og mellemeuropæisk tid M.E.T. kan findes af fig. 71, idet

$$\text{sand soltid} = \text{M.E.T.} + k.$$

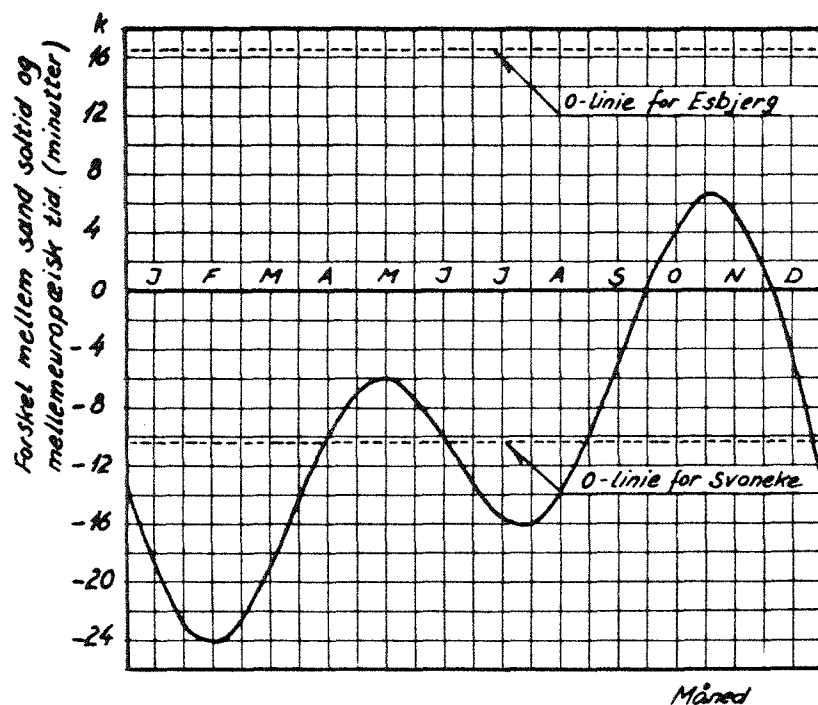


Fig. 71. Forskel mellem sand soltid og mellemeuropæisk tid i minutter for København.

Difference between true solar time and Central-European time as to minutes for Copenhagen.

Kurven gælder for steder med samme geografiske længde som København. På steder med anden geografisk længde forskydes 0-linien som vist på figur.

Væg-solazimuthvinklen  $\beta$  er vinklen mellem væggens lodrette normalplan og solstrålernes projektion på den vandrette plan, d.v.s.

$$\beta = \alpha_s - \alpha_v. \beta \text{ regnes med fortegn.}$$

Indfaldsvinklen "i" er vinklen mellem væggens normal og retningen af den indfaldende stråling. Indfaldsvinklen er bestemt af  $h$ ,  $\beta$  og  $\gamma$ , idet

$$\cos i = \cosh \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma + \sinh \cdot \sin \gamma. \quad (11.1.1)$$

For en lodret væg, hvor  $\gamma = 0$  er

$$\cos i = \cosh \cdot \cos \beta \quad (11.1.2)$$

Profilvinklen  $\varphi$  er for den lodrette væg solhøjdens projektion på væggens lodrette normalplan.  $\varphi$  er bestemt af  $h$  og  $\beta$ , idet

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{tg} h}{\cos \beta} \quad (11.1.3)$$

For den skrå væg er  $\varphi = \varphi_{\text{lodret}} - \gamma$ .

## 11.2 Solstrålingen

Ved beregningen af solindfaldet på en væg eller gennem et vindue må man skelne imellem tre forskellige bidrag, nemlig den direkte stråling, himmelstrålingen og den fra jordoverfladen reflekterede stråling.

Strålingsintensiteten varierer som tidligere beskrevet med årstiden, men kan desuden ved særlig klar atmosfære blive en del større. Da der ikke er foretaget systematiske målinger af den direkte stråling i Danmark, har vi ingen tal for den maksimale strålingsintensitet. I U.S.A har J.L. Threlkeld [6] ved målinger i Minneapolis i 1958-59 målt, at strålingsintensiteten en dag kan være ca. 12% større eller mindre end middelintensiteten i klart vejr. Lunelund har ved målinger i Helsingfors i 1927-33 fundet forholdet mellem de målte maksimumsværdier og middelværdien af den direkte stråling i klart vejr som funktion af solhøjden som vist på fig. 72 [17].

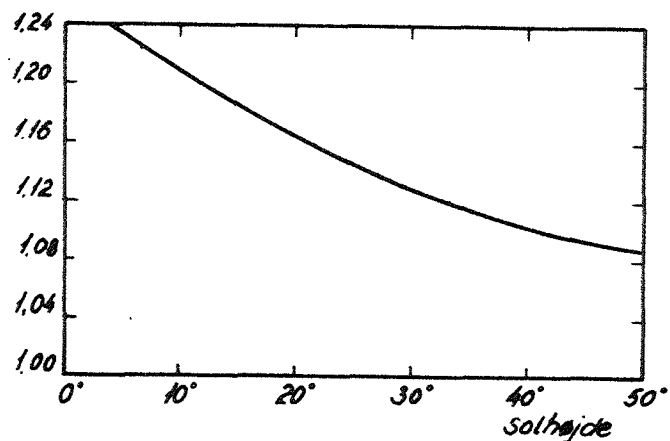


Fig. 72. Forholdet mellem målte maksimumsværdier og middelværdier af intensiteten af den direkte stråling i klart vejr som funktion af solhøjden. (Lunelund).

Relationship between maximum measured and mean values of the intensity of direct solar radiation in clear weather as function of solar altitude. (Lunelund).

Ved beregningerne, som foretages i det følgende, bestemmes den direkte stråling af Moons kurve (fig. 4) ved middelsolafstanden. I kritiske tilfælde må man derfor give et passende tillæg.

Den diffuse himmelstråling på en vandret plan beregnes af ligning 1.2.1 med  $\kappa = 0,33$  (fig. 6). Himmelstrålingen på en lodret plan beregnes af strålingen på en vandret, idet forholdet mellem den diffuse himmelstråling på den vandrette og lodrette plan bestemmes af fig. 8.

Den diffuse reflekterede stråling bestemmes af ligning 1.3.1, idet det forudsættes, at jordoverfladen er ensartet belyst, og refleksionen er fuldstændig diffus. Fig. 73 viser den diffuse reflekterede stråling. Den ene intensitetsskala gælder for en refleksionskoefficient  $R = 0,1$  og den anden for  $R = 0,25$ . Det er endvidere forudsat, at horisonten er fri.

### 11.3 Beregning af solindfaldet gennem et vindue

Størrelsen af den direkte stråling, som transmitteres gennem en dobbeltrude, er en funktion af indfaldsvinklen og bestemmes ved hjælp

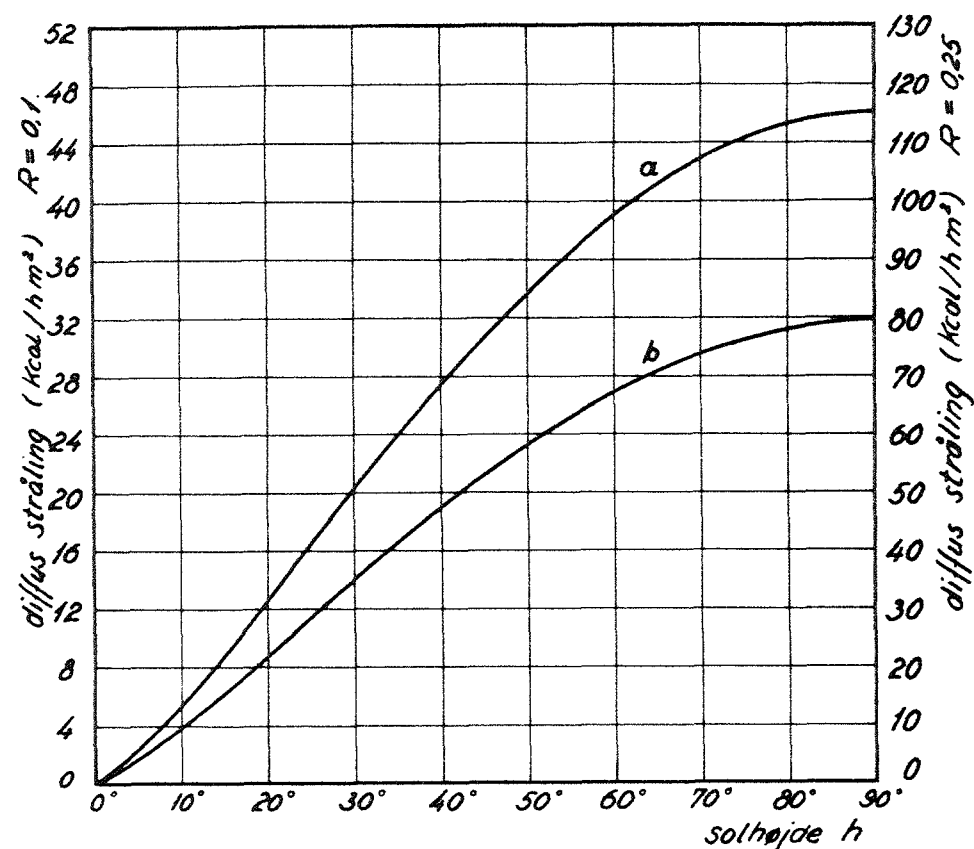


Fig. 73. Diffus stråling reflekteret fra jorden a) mod lodret væg, b) gennem alm. dobbeltrude, som funktion af solhøjden.

Diffuse radiation reflected from the ground a) towards vertical wall, b) through common double pane as function of the altitude angle of the sun.

af fig. 16, mens transmissionskoefficienten for den diffuse stråling er 0,69 (side 29).

Den varmemængde, som transmitteres gennem et afskærmet vindue, kan derefter beregnes af ligning 5.1.1 eller 5.1.2, når afskærmningsfaktoren er kendt.

### Eksempel

Beregn det totale solindfald gennem et SV-vendt vindue med alm. dobbeltrude den 15. august kl. 15 sand soltid ( $56^{\circ}$  n.b.). Refleksionskoefficient for jordoverfladen er 0,25.

Af fig. 68 bestemmes solhøjden  $h$  til  $36^{\circ}$ .

Af fig. 4 bestemmes  $H_{D,n}$  til  $680 \text{ kcal/hm}^2$ .

Azimuth for et SV-vendt vindue er  $+45^{\circ}$ .

Azimuth for solen er iflg. fig. 70  $+58^{\circ}$ .

Væg-solazimuth  $\beta = 45 - 58 = -13^{\circ}$ .

Indfaldsvinklen bestemmes af ligning 11.1.2

$$\cos i = \cos 36 \cos(-13) \quad i \cong 38^{\circ}$$

Transmissionskoefficienten er iflg. fig. 16 0,775.

Den direkte stråling, som rammer vinduet, er

$$H_{D,n} \cdot \cos i = 680 \cos 38^{\circ} = 536 \text{ kcal/hm}^2$$

Den transmitterede stråling er  $536 \cdot 0,775 = 415 \text{ kcal/hm}^2$ .

Af fig. 6 aflæses den diffuse stråling på en vandret plan til  $94 \text{ kcal/hm}^2$ .

Af fig. 8 aflæses, at intensiteten af himmelstrålingen er 1,13 gang større på den lodrette rude end på en vandret plan. Størrelsen af den transmitterede diffuse himmelstråling bliver da

$$94 \cdot 1,13 \cdot 0,69 = 73 \text{ kcal/hm}^2$$

Den reflekterede stråling, som rammer vinduet, er bestemt af ligning 1.3.1

$$H_{d,r} = 0,5 \cdot 0,25(680 \sin 36 + 94) = 62 \text{ kcal/hm}^2$$

Af den reflekterede stråling transmitteres der  $62 \cdot 0,69 = 43 \text{ kcal/hm}^2$ .

Total transmitteret solstråling bliver da

$$415 + 73 + 43 = 531 \text{ kcal/hm}^2$$

### 11.4 Beregning af solindfald ved hjælp af diagrammer

Idet strålingsintensiteten, som rammer eller transmitteres gennem et lodret vindue, er en funktion af solhøjden  $h$  og væg-solazimuthvinklen  $\beta$ , kan man forenkle beregningerne ved én gang for alle at beregne strålingsintensiteten ved forskellige værdier af  $h$  og  $\beta$  og afbilde dem grafisk, som vist på diagram 1, 2, 3 og 4 (bilag). Beregningsgrundlaget for diagrammerne er angivet i det foregående. Refleksionskoefficienten for jordoverfladen er sat til 0,25 svarende til en græsmark. Diagrammerne dækker følgende tilfælde,

Diagram 1: Transmission af den direkte stråling gennem en almindelig dobbeltrude (primær og sekundær varmestrøm) som funktion af  $h$  og  $\beta$ .

Diagram 2: Transmission af den diffuse himmelstråling gennem en almindelig lodret dobbeltrude (primær og sekundær varmestrøm) som funktion af  $h$  og  $\beta$ .

Diagram 3: Transmission af den direkte stråling + den diffuse himmelstråling + den fra jordoverfladen reflekterede stråling gennem en almindelig lodret dobbeltrude (primær og sekundær varmestrøm) som funktion af  $h$  og  $\beta$ .

Diagram 4: Den direkte stråling + den diffuse himmelstråling + den fra jordoverfladen reflekterede stråling, som rammer en lodret væg, som funktion af  $h$  og  $\beta$ .

Den diffuse himmelstråling, som rammer en lodret væg fås af diagram 2, idet de aflæste værdier multipliceres med  $1/0,69 = 1,45$ .

Diagram 5 og 6 viser solhøjden som funktion af azimuthvinklen [16] den 1. og 15. i hver måned.

Ved at sammenholde diagram 5 eller 6 med diagram 1, 2, 3 eller 4 kan man direkte aflæse solindfaldet på en given lodret væg eller gennem et givet lodret vindue ved  $56^{\circ}$  n.b. Ved en anden breddegrad benyttes en anden dagbue for solhøjden. Metoden er angivet af Matts Bäckström [18].

### Eksempel på brug af diagram

Det totale solindfald gennem et SV-vendt vindue ønskes bestemt den 15. august.  $56^{\circ}$  n.b., fri horisont.



Kurven over solhøjden den 15. aug. (diagram 6) tegnes over på en kalke, der lægges over diagram 3, således at væg-solazimuthvinklen kommer til at svare til en SV-vendt facade. Idet azimuthvinklen for vinduet er  $+45^\circ$ , og azimuthvinklen for solen er  $0^\circ$  kl. 12, er  $\beta = \alpha_s - \alpha_v = 0 - 45 = -45^\circ$  kl. 12.

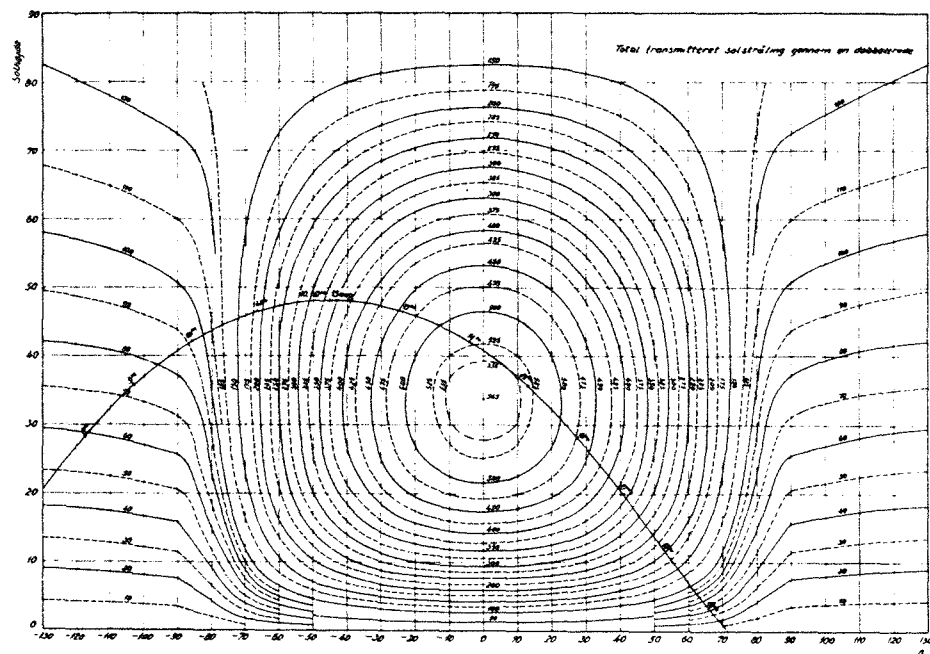


Fig. 74. Soldiagram med indtegnet solhøjde for 15. aug.  $56^\circ$  n.b. for SV-vendt vindue.

Solar-graph with curve showing the solar altitude on the 15<sup>th</sup> of aug.,  $56^\circ$  north latitude, for window facing south-west.

Kalken med solhøjden lægges over diagrammet, således at  $\beta$  kl. 12 er  $-45^\circ$ , fig. 74. Man kan derefter direkte aflæse den totale transmitterede solstråling gennem et dobbeltvindue på et hvilket som helst tidspunkt den 15. aug. f.eks.  $530 \text{ kcal/hm}^2$  kl. 15 som beregnet på side 124. På fig. 75 er tegnet den totale transmitterede stråling den pågældende dag som funktion af tiden (sand soltid).

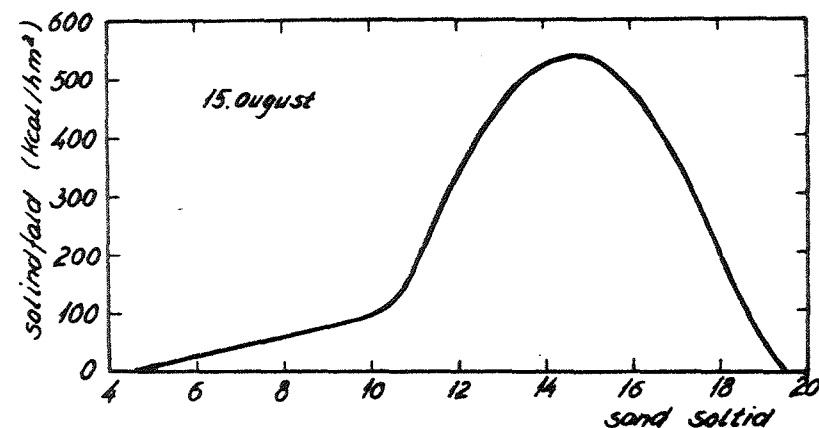


Fig. 75. Total transmitteret solstråling gennem SV-vendt alm. dobbelt vindue i klart vejr d. 15. aug.  $56^\circ$  n.b.

Total transmitted solar radiation through south-west faced double pane in clear weather aug. the 15<sup>th</sup>,  $56^\circ$  north latitude.

Beregning af solindfaldet gennem et afskærmet vindue.

Solindfaldet ønskes bestemt for vinduet i foregående eksempel, når dette forsynes med a. et hvidt gardin eller b. en udvendig persienne.

a. Med en afskærmningsfaktor  $F = 0,44$  for det hvide gardin fig. 35 finder man (d. 15. aug. kl. 15)

$$H^A = F \cdot H^U = 0,44 \cdot 530 = 233 \text{ kcal/hm}^2$$

b. I tilfældet med den udvendige persienne må man skelne mellem direkte og diffus stråling. Kl. 15 aflæses solhøjden til  $36^\circ$  og  $\beta$  til  $13^\circ$  (fig. 74). Profilvinklen  $\varphi$  er i dette tilfælde næsten lig solhøjden,  $\varphi = 37^\circ$  (fig. 77 eller ligning 11.1.3).

Afskærmningsfaktoren for direkte og diffus stråling er henholdsvis  $F_D = 0,07$  og  $F_d = 0,28$  (fig. 65).

Af diagram 1 bestemmes ved hjælp af solhøjdekurven, som tidligere beskrevet, den direkte transmitterede stråling gennem dobbeltruden til  $H_D^U = 415 \text{ kcal/hm}^2$ . Den diffuse transmitterede stråling er da

$$H_d^U = 530 - 415 = 115 \text{ kcal/hm}^2$$

Gennem vinduet med den udvendige persienne transmitteres der da

$$H^A = H_D^U \cdot F_D + H_d^U \cdot F_d = 415 \cdot 0,07 + 115 \cdot 0,28 = 61 \text{ kcal/hm}^2$$

Ved målingerne d. 12-8 (fig. 55) målte man afskærmningsfaktoren  $F$  for totalstrålingen til 0,12 ved solhøjden  $36^\circ$ . Benyttes dette her, fås  $H^A = H^U \cdot F = 530 \cdot 0,12 = 64 \text{ kcal/hm}^2$ .

Det skal bemærkes, at det kun er et sammentræf, at man får samme værdi af  $H^A$ , når man benytter  $F$  i stedet for  $F_D$  og  $F_d$ , idet fig. 55 kun gælder for den fordeling af den diffuse stråling, der var ved målingerne den pågældende dag.

### 11.5 Skygge af udhæng på lodret væg

Det sker ofte, at et tagudhæng eller en balkon delvis skygger for den direkte stråling. Skyggens længde  $l$  (fig. 76) på den lodrette væg er bestemt af fremspringets kants afstand  $a$  fra den lodrette væg samt profilvinklen  $\varphi$ , idet  $l = a \operatorname{tg} \varphi$ . Profilvinklen  $\varphi$  er bestemt af solhøjden  $h$  og azimuthvinklen  $\beta$ , idet

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{tg} h}{\cos \beta} = x$$

$$l = a \operatorname{tg} \varphi = a \cdot x \quad (11.5.1)$$

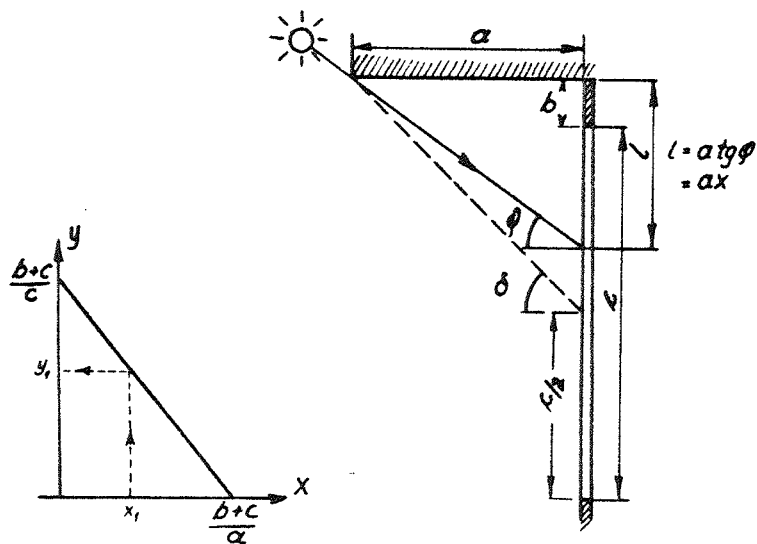


Fig. 76.

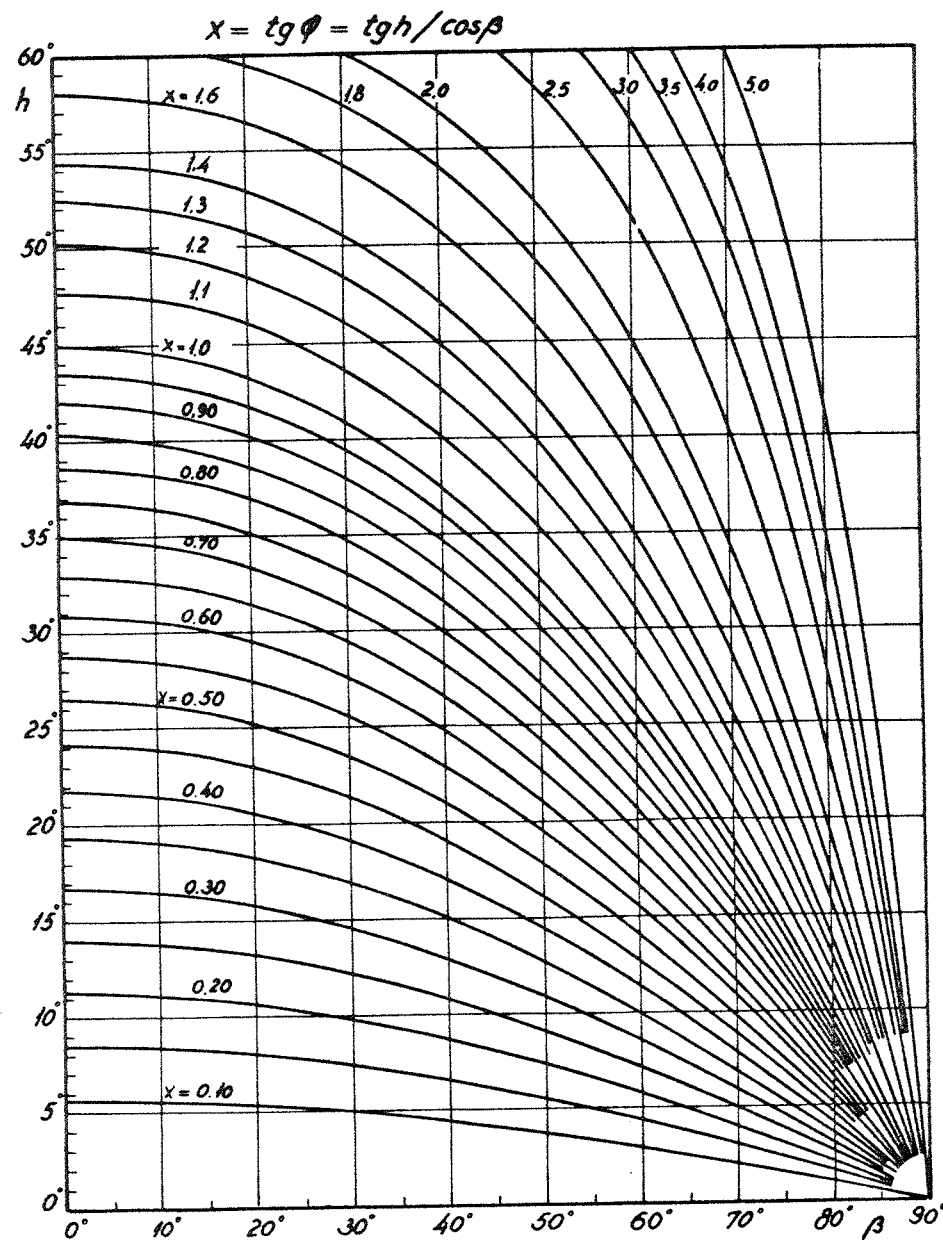


Fig. 77.

Sammenhørende værdier af  $h$  og  $\beta$  kan f.eks. bestemmes, når kalken med solhøjden lægges over soldiagrammet. Faktoren  $x$  kan derefter bestemmes af fig. 77.

Hvis vinduets øverste kant ligger i afstanden  $b$  under den frem-springende kant, og vinduets højde er  $c$ , vil den brøkdel  $y$  af vinduet, der er bestrålet, være bestemt af

$$y = \frac{b+c-ax}{c} \quad (11.5.2)$$

$y$  er en retliniet funktion af  $x$ . Skal man bestemme et større antal sammenhørende værdier af  $x$  og  $y$ , kan man finde dem grafisk ved at tegne linien som vist på fig. 77.

Udhængt vil desuden skygge for en del af himmelhvælvingen, således at den diffuse stråling fra denne formindskes. Uden udhæng er vinduets vinkelforhold til himmelhvælvingen 0,5. Med udhæng er vinduets midtpunkts vinkelforhold til himmelhvælvingen  $0,5 \cdot \sin \delta$  hvor  $\delta$  er bestemt af

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{b+c/2}{a} \quad (11.5.3)$$

under forudsætning af, at udhængt er uendelig langt.

Regner man tilnærmelsesvis den diffuse himmelstråling  $H_d^H$ , som rammer vinduet uden udhæng jævnt fordelt over den halve himmelhvælving, er den himmelstråling, som rammer vinduet med udhængt, bestemt af

$$H_d^H \cdot \sin \delta, \quad (11.5.4)$$

Der ses bort fra den diffuse stråling, som reflekteres fra undersiden af udhængt.

Som eksempel benyttes som tidligere et SV-ventt vindue d. 15. aug. kl. 15. Målene på vindue og fremspring er følgende:  $a = 1,0$  m,  $b = 0,2$  m,  $c = 1,6$  m. Hvis vinduet er 2 m bredt, er arealet  $3,2$  m<sup>2</sup>. Ved  $h = 36^\circ$  og  $\beta = 13^\circ$  finder man  $x = 0,75$  og  $l = ax = 1,0 \cdot 0,75 = 0,75$  m. Den brøkdel af den direkte stråling, som rammer vinduet, er bestemt af ligning 11.5.2

$$y = \frac{0,2+1,6-0,75}{1,6} \cong 0,66$$

Vinklen  $\delta$ , som bestemmes af vinduets midtpunkt og udhængets kant, er bestemt ved

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{0,2+0,8}{1} \quad \delta = 45^\circ$$

Idet den transmitterede direkte stråling, himmelstrålingen og den reflekterede stråling for det uafskærmede vindue er henholdsvis 415 kcal/hm<sup>2</sup> (diagram 1), 73 kcal/hm<sup>2</sup> (diagram 2) og 43 kcal/hm<sup>2</sup> (fig. 73), bliver den totale transmission gennem vinduet med udhængt

direkte stråling:  $415 \cdot y \cdot \text{areal} = 415 \cdot 0,66 \cdot 3,2 = 876$  kcal/h

himmelstråling:  $73 \sin \delta \cdot \text{areal} = 73 \cdot 0,707 \cdot 3,2 = 165$  kcal/h

reflekteret stråling:  $43 \cdot \text{areal} = 43 \cdot 3,2 = 138$  kcal/h

Total transmitteret solvarme = 1179 kcal/h eller

gennemsnitlig 368 kcal/hm<sup>2</sup>

#### 11.6 Transmissionstab

I beregningsseksemplerne er den beregnede transmitterede solvarme alene forårsaget af solstrålingen. Hvis der er en forskel på den indvendige og udvendige lufttemperatur, vil der desuden ske et transmissionstab  $H_t$  gennem vinduet, idet

$$H_t = k(\vartheta_i - \vartheta_u) \text{ kcal/hm}^2,$$

hvor  $k$  er vinduets  $k$ -værdi.

Den indvendige og udvendige lufttemperatur skulle strengt taget erstattes af den indvendige og udvendige retningstemperatur (jvf. appendix A). Tilnærmelsen, man begår ved at benytte lufttemperaturerne, vil i klart vejr medføre, at  $\vartheta_u$  regnes for høj, d.v.s. tilnærmelsen er på den sikre side, hvad angår beregningen af kølebehovet for rummet.

#### 11.7 Afskærmningsfaktorer

Afskærmningsfaktoren for en given vindueskonstruktion varierer med indfaldsvinklen eller profilvinklen, men i mange tilfælde er variationerne ikke større, end at man kan benytte en enkelt værdi for

afskærmningsfaktoren. I tabel 11.7.1 og 11.7.2 er angivet nogle værdier for afskærmningsfaktoren F. Værdierne er beregnet på grundlag af tabeller i ASHRAE Guide [8] og J.C. Borel's målinger [19]. Da den amerikanske afskærmningsfaktor S refererer til en enkelte uafskærmet rude med en total transmissionskoefficient på 0,89 og den her benyttede afskærmningsfaktor F refererer til en uafskærmet dobbeltrude med en total transmissionskoefficient på 0,79, er værdierne i tabel 11.7.1 fremkommet ved multiplikation af værdierne for S med 1,13. Idet Borel's afskærmningsfaktor S refererer til den stråling, der rammer vinduet, kan man ligeledes beregne den værdi af F, der svarer til S ved multiplikation med 1/0,79.

Det er forudsat, at der ikke transmitteres direkte stråling gennem afskærmningen.

| Data for afskærmningerne i tabel 11.7.1                         | T    | R    | A    |
|---|------|------|------|
| Persienne (Forholdet mellem lamelbredde og lamelafstand er 1,2) |      |      |      |
| Lys farvet lamel  | -    | 0,6  | 0,4  |
| Middel " "  | -    | 0,4  | 0,6  |
| Rullegardin, uigennemskinneligt                                 |      |      |      |
| Lys farvet  | 0    | 0,8  | 0,2  |
| Mørk farvet   | 0    | 0,12 | 0,88 |
| Gardiner  |      |      |      |
| Åben vævning, lys farvet tråd                                   | 0,55 | 0,35 | 0,10 |
| middel " "  | 0,48 | 0,30 | 0,22 |
| mørk " "  | 0,40 | 0,15 | 0,45 |
| Halvåben vævning, lys farvet tråd                               | 0,40 | 0,50 | 0,10 |
| middel " "  | 0,30 | 0,35 | 0,35 |
| mørk " "  | 0,20 | 0,20 | 0,60 |
| Tæt vævning, lys farvet tråd                                    | 0,30 | 0,55 | 0,15 |
| middel " "  | 0,15 | 0,40 | 0,45 |
| mørk " "  | 0,10 | 0,20 | 0,70 |

Åben, halvåben og tæt vævning har et åbningsforhold på henholdsvis 0,04, 0,14 og 0,35.

Data for afskærmningen i tabel 11.7.2

En afskærmning karakteriseret ved "lys" har en reflektionskoefficient, der er større end 0,5, mens "middel" og "mørk" karakteriserer afskærmninger med reflektionskoefficienter beliggende i intervallerne 0,3-0,5 og 0,1-0,3.

Tabel 11.7.1 Afskærmningsfaktoren F

|                                    | lys  | middel    | mørk |
|------------------------------------|------|-----------|------|
| Afskærmning bag en enkelt rude     |      |           |      |
| Persienne, lamelhældning 45°       | 0,62 | 0,72      |      |
| Rullegardin, uigennemskinnelig     | 0,28 |           | 0,67 |
| Gardin, åben vævning               | 0,76 | 0,78      | 0,86 |
| halvåben vævning                   | 0,62 | 0,71      | 0,78 |
| tæt vævning                        | 0,53 | 0,64      | 0,75 |
| Afskærmning bag dobbelt rude       |      |           |      |
| Persienne, lamelhældning 45°       | 0,58 | 0,64      |      |
| Rullegardin, uigennemskinnelig     | 0,28 |           | 0,68 |
| Gardin, åben vævning               | 0,68 | 0,71      | 0,78 |
| halvåben vævning                   | 0,57 | 0,66      | 0,72 |
| tæt vævning                        | 0,50 | 0,60      | 0,70 |
| Afskærmning mellem to lag glas     |      |           |      |
| Persienne, lamelhældning 45°       | 0,37 | 0,41      |      |
| Udvendig afskærmning               |      |           |      |
| Persienne, lamelhældning 45°       |      | 0,10-0,15 |      |
| Markise                            |      | 0,25-0,50 |      |
| Reflekterende og absorberende glas |      |           |      |
| Afhængig af type og fabrikat       |      | 0,30-0,70 |      |

Afskærmningsfaktoren for en markise er afhængig af mange faktorer og kan ikke angives med en enkelt værdi.

Tabel 11.7.2 Afskærmningsfaktoren F

|  | lys  | middel | mørk |
|--|------|--------|------|
| Afskærmning bag en enkelt rude             |      |        |      |
| Persienne                                  | 0,57 | 0,71   | 0,82 |
| Gardin, uigennemskinnelig                  | 0,43 | 0,57   | 0,72 |
| lidt gennemskinnelig                       | 0,46 | 0,59   | 0,75 |
| temmelig gennemskinnelig                   | 0,49 | 0,63   | 0,65 |
| Afskærmning bag en dobbelt rude            |      |        |      |
| Persienne                                  | 0,59 | 0,75   | 0,87 |
| Gardin, uigennemskinnelig                  | 0,49 | 0,66   | 0,82 |
| lidt gennemskinnelig                       | 0,49 | 0,68   | 0,80 |
| temmelig gennemskinnelig                   | 0,53 | 0,70   | 0,86 |
| Afskærmning mellem to lag glas             |      |        |      |
| Persienne                                  | 0,35 | 0,43   | 0,51 |
| Gardin, uigennemskinnelig                  | 0,27 | 0,35   | 0,46 |
| lidt gennemskinnelig                       | 0,30 | 0,40   | 0,51 |
| temmelig gennemskinnelig                   | 0,37 | 0,46   | 0,54 |
| Udvendig afskærmning foran en enkelt rude  |      |        |      |
| Persienne af træ (1 cm tykke lameller)     | 0,16 | 0,14   | 0,14 |
| Persienne af metal                         | 0,18 | 0,18   | 0,16 |
| Udvendig afskærmning foran en dobbelt rude |      |        |      |
| Persienne af træ                           | 0,11 | 0,10   | 0,09 |
| Persienne af metal                         | 0,11 | 0,11   | 0,11 |

## 12. KONKLUSION

Prøvemålingerne med kalorimetret har vist, at den nøjagtighed, hvor- med man kan måle den varmemængde, som transmitteres gennem en vindueskonstruktion, svarer til den ønskede. Ved små solindfald aftager nøjagtigheden dog lidt på grund af usikkerheden på himmelhvelvingens temperatur. En nøjere undersøgelse af dette problem og en udvikling af en sikker målemetode, med hvilken man om dagen kan bestemme størrelsen af den langbolgede stråling, som udsendes fra himmelhvelvingen, vil forbedre målenøjagtigheden i disse tilfælde.

Det skal dog bemærkes, at ved meget effektive afskærmninger, hvor den transmitterede stråling er lille, er det kun den relative usikkerhed på den målte transmitterede stråling, der forøges. Usikkerheden i forhold til den stråling, som transmitteres gennem den uafskærmede rude, aftager derimod. Med hensyn til brugen af resultaterne i praksis er denne forøgelse af den relative usikkerhed således uden betydning.

Når kalorimetret benyttes til måling af transmissionsmodstanden for en vindueskonstruktion, hvor de registrerede varmemængder er små, og temperaturforskellen mellem kalorimetret og det fri er stor, er måleusikkerheden stor. Foretages der imidlertid en række justeringsmålinger i lighed med kontrolmålingerne nr. 6, 7 og 8, kan der udarbejdes en korrektion til det målte varmetab gennem sider og rand, således at usikkerheden kan nedsættes.

Ved målingerne, der er foretaget med solkalorimetret, har dette fulgt solen, og tilstanden har været tilnærmelsesvis stationær. I praksis, hvor vinduet ikke følger solen, vil man have en jævn stigende og aftagende intensitet i løbet af dagen. Vinduets varmekapacitet vil da forårsage en formindsket varmetilførsel ved opvarmningen af vindueskonstruktionen og en forøget ved afkølingen. Betydningen af dette forhold vil i høj grad afhænge af vindueskonstruktionens varmekapacitet og absorptionskoefficient. Målingerne, der er foretaget med hurtige ændringer af indfaldsvinklen, har imidlertid for de her undersøgte afskærmninger ikke påvirket resultatet af den målte værdi af afskærmningsfaktoren  $F$  særligt. For vindueskonstruktioner, hvor dette forhold kan have betydning, kan dette imidlertid undersøges ved målinger med solkalorimetret i en fast position.

Den skrå stilling, som kalorimetret sommetider antager, kan på grund af de ændrede betingelser for konvektionen tænkes at påvirke størrelsen af denne, især ved indvendige afskærmninger, hvor en stor del af varmen netop afgives ved konvektion. Målingerne har da også vist tegn på, at dette er tilfældet. Man kan dog bøde på dette ved i sådanne tilfælde at afpasse den valgte indfaldsvinkel efter solhøjden og kun have små hældninger på vinduet.

Solkalorimetrets omgivelser vil i nogle tilfælde kunne påvirke måleresultaterne, idet den afskærmende virkning af f.eks. en persienne er afhængig af forholdet mellem den reflekterede diffuse stråling fra jordoverfladen og den diffuse himmelstråling. Dette kan man imidlertid tage hensyn til ved behandlingen af måleresultaterne, således at de bliver almenlydige.

Ved hjælp af soldigrammerne kan man beregne solindfaldet gennem en dobbeltrude med en given orientering på et hvilket som helst tidspunkt af året. De angivne intensiteter repræsenterer de værdier, man kan forvente, men i nogle tilfælde kan strålingsintensiteten blive større end angivet her. På grund af manglende systematiske målinger kan der imidlertid ikke siges noget om, hvilke maksimumsværdier man kan forvente. Diagrammerne er baseret på, at horisonten er fri. Er træer eller bygninger foran vinduet så høje, at de skjuler en del af solens bane, vil solindfaldet naturligvis blive formindsket. G. Pleijel behandler dette problem i [2].

Ved undersøgelserne, der er foretaget her, indgår kun vinduets glasareal i beregningerne, idet vinduets karm må betragtes som værende en del af vægkonstruktionen. Vinduets stolper og sprosser absorberer også en del af solvarmen, men dette bidrag vil i de fleste tilfælde være ubetydeligt i forhold til den varme, der transmitteres gennem den gennemsigelige del af vinduet.

Det skal endelig bemærkes, at der ikke er nogen umiddelbar sammenhæng mellem den tilførte solvarme og rummets termiske forhold og eventuelle kolebehov, idet varmekapaciteten af vægge, gulv, loft, inventar o.s.v. spiller en betydelig rolle. Da de termiske forhold i allerhøjeste grad er instationære, er det nødvendigt at benytte avancerede beregningsmetoder til bestemmelse af rummets klimatiske forhold. Disse problemer er behandlet i litteraturen, hvor der er

opstillet forskellige tilnærmede beregningsmetoder. Laboratoriet for Varmeisolering har imidlertid som tidligere nævnt konstrueret og bygget en elektrisk analogiregnemaskine, specielt egnet til løsning af sådanne opgaver.

## APPENDIX A

### Glasrudens varmeveksling med omgivelserne ved langbølget stråling og konvektion

#### Stråling

Lad os antage, at det halvrum, glasfladen "ser", består af  $n$  flader med ensartet men forskellig temperatur  $\vartheta_p$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]. Hvis flade  $p$ 's emissionstal er  $\epsilon_p$  og dens vinkelforhold til glasfladen er  $\varphi_p$ , vil den samlede strålingsintensitet mod ruden være

$$\sum_{p=1}^n \varphi_p \epsilon_p c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_p}{100} \right]^4 \quad [\text{kcal/hm}^2] \quad (1)$$

idet  $c_s$  er strålingstallet for et absolut sort legeme. Da fladernes absorptionsforhold er stort, ses der bort fra refleksstrålingen fra de  $n$  flader.

Hvis glasfladen har absorptionsforholdet  $a_g$  = emissionsforholdet  $\epsilon_g^*$ , vil den absorberede varmemængde blive

$$\epsilon_g \sum_{p=1}^n \varphi_p \epsilon_p c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_p}{100} \right]^4 \quad [\text{kcal/hm}^2] \quad (2)$$

Hvis glasfladens temperatur er  $\vartheta_g$ , vil den udsendte strålingsintensitet være

$$\epsilon_g c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_g}{100} \right]^4 \quad [\text{kcal/hm}^2]$$

Den resulterende varmestrom ved stråling til glasfladen fra halvrummet bliver da

$$H_R^s = \epsilon_g \sum_{p=1}^n \varphi_p \epsilon_p c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_p}{100} \right]^4 - \epsilon_g c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_g}{100} \right]^4 \quad [\text{kcal/hm}^2] \quad (3)$$

Den indvendige side af glasfladen i kalorimetret "ser" de 5 sorte vægflader, mens den udvendige side af glasfladen "ser" 2 flader, nemlig jordoverfladen og himmelhvælvingen.

\* Kirchhoffs lov

## Glasfladens varmeveksling med det fri

Den langbølgede stråling fra en skyfri himmel udsendes af atmosfæren og er afhængig af luftlagens temperatur og deres indhold af vanddamp og kuldioxid. Størrelsen af denne stråling er blevet bestemt af forskellige forskere, og man har fundet frem til, at strålingen fra atmosfæren kan sidestilles med strålingen fra et fast legeme, idet strålingsintensiteten er bestemt ved

$$G = \varepsilon_G c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_1}{100} \right]^4 \quad [\text{kcal/hm}^2] \quad (4)$$

hvor  $\vartheta_1$  er lufttemperaturen, og  $\varepsilon_G$  er en empirisk faktor, der er en funktion af damptrykket ved jordoverfladen.

Ifølge Ångström [20] er denne faktor bestemt af ligningen

$$\varepsilon_G = A - B \cdot 10^{-\gamma p} \quad (5)$$

hvor A, B og  $\gamma$  er konstanter, og p er vanddamptrykket i mmHg. Ångström angiver konstanterne til A = 0,790, B = 0,254 og  $\gamma = 0,069$ .

Brunt [21] har på grundlag af 6 års systematiske observationer udført af W.H. Dines og L.H.G. Dines opstillet følgende udtryk for  $\varepsilon_G$ :

$$\varepsilon_G = a + b \sqrt{P_w} \quad (6)$$

hvor a og b er konstanter, og  $P_w$  er vanddamptrykket ved jordoverfladen. Brunt angiver konstanterne til a = 0,55 b = 0,33, når  $P_w$  er vanddamptrykket i inc.Hg.

På fig. 78 er afbildet  $\varepsilon_G$  som funktion af vanddamptrykket, beregnet efter Ångströms formel og Brunts formel.

De ovennævnte formler gælder imidlertid kun for stråling imod en vandret flade, idet strålingstætheden ikke er den samme for hele himmelhvelvingen.

Ved hjælp af Dines' målinger af strålingen fra partier af himmelhvelvingen ved forskellige højder over horisonten har Brunt opstillet følgende empiriske formel til bestemmelse af konstanterne i ligning (6)

$$a = 0,64 - 0,14 \sin \theta \quad b = 0,33 \quad (7)$$

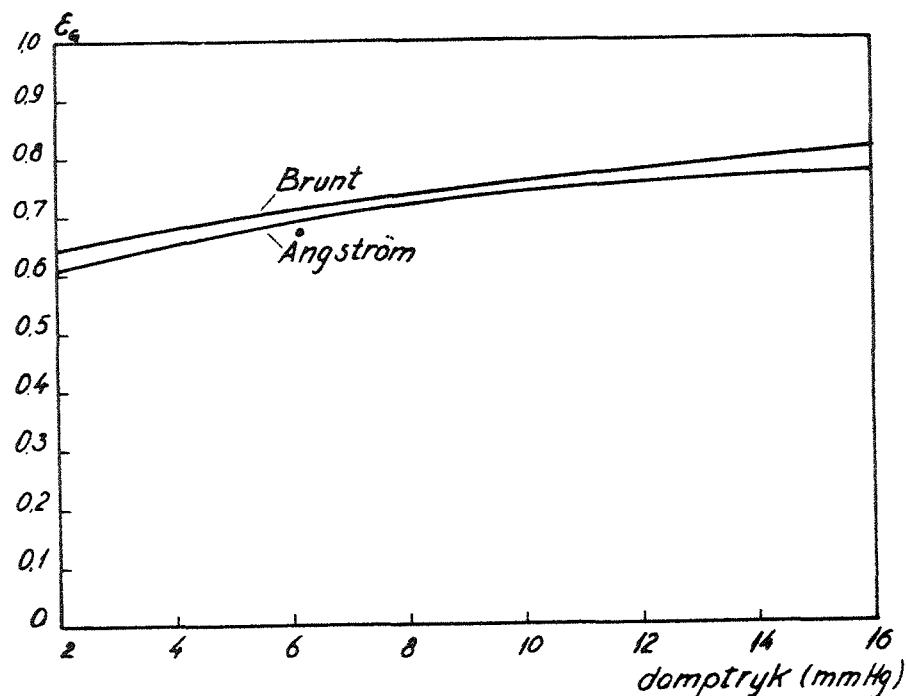


Fig. 78. Faktoren  $\varepsilon_G$  som funktion af vanddamptrykket.

The factor  $\varepsilon_G$  as function of the water vapour-pressure.

idet  $\theta$  er vinklen mellem det vandrette plan og normalen til det betragtede fladeelement på himlen.

Når man vil bestemme den totale stråling fra himmelhvelvingen til en skra flade på jorden, må denne bestemmes ved integration. For en flade, der danner vinklen x med vandret, fås således:

$$a = 0,32(1 + \cos x) - 0,0207(\sin x + (\pi - x)\cos x) \quad (8)$$

$$b = 0,165(1 + \cos x) \quad (9)$$

På dette grundlag kan man beregne den strålingstemperatur, man skal tillægge himmelhvelvingen.

Den langbølgede stråling, som udsendes fra jordoverfladen, er bestemt af dennes temperatur og emissionsforhold. Ved de målinger, der er udført med solkalorimetret, er jordoverfladen bevokset med græs



eller lignende. I disse tilfælde kan man med tilnærmelse sætte marktemperaturen lig lufttemperaturen.

Da jordoverfladen absorberer en del af solstrålingen, vil den i de fleste tilfælde have en temperatur, der er større end lufttemperaturen. Ved varmetransmissionen gennem vinduet skelner vi mellem den varme, som tilføres rummet på grund af temperaturforskelle mellem rummet og det fri, og den varme, som tilføres rummet på grund af solen. Den brøkdelen af den langbølgede stråling, som udsendes fra marken på grund af dens overtemperatur i forhold til luften, kan man principielt regne som hørende til solstrålingen, og tilnærmelsen, som man foretager ved at sætte marktemperaturen lig lufttemperaturen, er uden betydning.

Idet jordoverfladens emissionsforhold er  $\epsilon_Y$ , er den udsendte strålingsintensitet bestemt ved

$$\epsilon_Y c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_l}{100} \right]^4 \quad [\text{kcal/hm}^2] \quad (10)$$

Idet glasfladens vinkelforhold til himmelhvelvingen er  $\varphi$ , bliver dens vinkelforhold til jordoverfladen  $(1 - \varphi)$ .

Den resulterende varmestrøm ved langbølget stråling til glasfladen fra det fri bliver da

$$H_{R,u}^s = \epsilon_g \left[ \varphi \epsilon_G c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_l}{100} \right]^4 + (1 - \varphi) \epsilon_Y c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_l}{100} \right]^4 \right] - \epsilon_g c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_{g,u}}{100} \right]^4 \quad (11)$$

hvor  $\vartheta_{g,u}$  er glastemperaturen.

Ved de regneoperationer, der foretages ved behandlingen af måleresultaterne, er det mere bekvemt at have denne ligning på formen:

$$H_{R,u}^s = \frac{\vartheta_{R,u}^s - \vartheta_{g,u}}{M_{R,u}^s}, \quad \text{hvor}$$

$\vartheta_{R,u}^s$  er den resulterende strålingstemperatur i det fri og  $M_{R,u}^s$  det resulterende overgangsmodstandstal ved strålingen.

Erstattes himmelhvelvingen af en absolut sort flade, og strålingsintensiteten fra denne flade skal være lig strålingsintensiteten fra himmelhvelvingen, er den sorte flades temperatur  $\vartheta_h$  (himmelhvelvingens strålingstemperatur) bestemt ved ligningen

$$c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_h}{100} \right]^4 = \epsilon_G c_s \left[ \frac{273 + \vartheta_l}{100} \right]^4 = G \quad (13)$$

For at forenkle beregningerne gøres den tilnærmelse, at jordoverfladens emissionsforhold  $\epsilon_Y \sim 0,95$  sættes lig 1. Fejlen, man herved begår, er ubetydelig i forhold til usikkerheden på  $\epsilon_G$ .

Af (11) og (13) fås da

$$H_{R,u}^s = \varphi \epsilon_g c_s \left[ \left[ \frac{273 + \vartheta_h}{100} \right]^4 - \left[ \frac{273 + \vartheta_{g,u}}{100} \right]^4 \right] + (1 - \varphi) \epsilon_g c_s \left[ \left[ \frac{273 + \vartheta_l}{100} \right]^4 - \left[ \frac{273 + \vartheta_{g,u}}{100} \right]^4 \right] \quad (14)$$

Heri indføres temperaturfaktorerne

$$\theta_h = \frac{\vartheta_h - \vartheta_{g,u}}{\left[ \frac{273 + \vartheta_h}{100} \right]^4 - \left[ \frac{273 + \vartheta_{g,u}}{100} \right]^4} \quad [^\circ\text{C}^{-3}] \quad (15)$$

$$\theta_Y = \frac{\vartheta_l - \vartheta_{g,u}}{\left[ \frac{273 + \vartheta_l}{100} \right]^4 - \left[ \frac{273 + \vartheta_{g,u}}{100} \right]^4} \quad [^\circ\text{C}^{-3}] \quad (16)$$

$$H_{R,u}^s = \varphi \epsilon_g c_s \frac{\vartheta_h - \vartheta_{g,u}}{\theta_h} + (1 - \varphi) \epsilon_g c_s \frac{\vartheta_l - \vartheta_{g,u}}{\theta_Y} \quad (17)$$

Da glasfladen er lille i forhold til omgivelserne, har vi overgangsmodstandstallene

$$M_h = \frac{\theta_h}{\epsilon_g c_s} \quad (18)$$

$$M_Y = \frac{\theta_Y}{\epsilon_g c_s} \quad (19)$$

Af (17), (18) og (19) fås da:

$$H_{R,u}^s = \varphi \frac{\vartheta_h - \vartheta_{g,u}}{M_h} + (1 - \varphi) \frac{\vartheta_l - \vartheta_{g,u}}{M_Y}$$

$$= \left[ \varphi \frac{\vartheta_h}{M_h} + (1-\varphi) \frac{\vartheta_1}{M_\gamma} \right] - \left[ \frac{\varphi}{M_h} + \frac{1-\varphi}{M_\gamma} \right] \vartheta_{g,u}$$

$$\text{Idet } \frac{1}{M_{R,u}} = \frac{\varphi}{M_h} + \frac{1-\varphi}{M_\gamma} \quad (20) \quad \text{og } \vartheta_{R,u}^s = \left[ \frac{\varphi \vartheta_h}{M_h} + \frac{(1-\varphi)\vartheta_1}{M_\gamma} \right] M_{R,u}^s \quad (21)$$

$$\text{fås } H_{R,u}^s = \frac{\vartheta_{R,u}^s - \vartheta_{g,u}}{M_{R,u}} \quad [\text{kcal/hm}^2] \quad (22)$$

### Konvektion

Glasfladens varmeveksling med det fri ved konvektion er bestemt af ligningen

$$H_u^k = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_{g,u}}{M_u^k}, \quad (23)$$

hvor  $M_u^k$  er overgangsmodstandstallet for tvungen konvektion.

$M_u^k$  bestemmes af den empiriske formel

$$\frac{1}{M_u^k} = 5 + 3,4v \quad \text{for } v \leq 5 \text{ m/sek} \quad (24)$$

$$\frac{1}{M_u^k} = 6,6 v^{0,75} \quad \text{for } v \geq 5 \text{ m/sek}$$

### Resulterende varmestrom fra rude til det fri

De to parallelle varmestrome giver en resulterende varmestrom  $H_{R,u}$

$$H_{R,u} = \frac{\vartheta_{R,u} - \vartheta_{g,u}}{M_{R,u}}, \quad \text{hvor} \quad (25)$$

$$\frac{1}{M_{R,u}} = \frac{1}{M_u^k} + \frac{\varphi}{M_h} + \frac{1-\varphi}{M_\gamma} \quad \text{og} \quad (26)$$

$$\vartheta_{R,u} = \left( \frac{\vartheta_1}{M_u^k} + \frac{\varphi \vartheta_h}{M_h} + \frac{(1-\varphi)\vartheta_1}{M_\gamma} \right) M_{R,u}, \quad \text{hvor} \quad (27)$$

$M_{R,u}$  er det resulterende modstandstal og  $\vartheta_{R,u}$  den resulterende temperatur.

### Himmelhvælvingens temperatur

Af ligningerne (4), (6), (8) og (9) kan man bestemme den stråling, et fladeelement, der danner vinklen  $\gamma$  med lodret, modtager fra den del af himmelhvælvingen, som fladeelementet "ser". Den værdi  $\varepsilon'_G$ , der bestemmes af (6), kan imidlertid ikke umiddelbart benyttes i (13) til bestemmelse af  $\vartheta_h$ , idet  $G$  her er strålingen fra hele himmelhvælvingen. For at få den stråling fra en hel himmelhvælving, som svarer til den del af himmelhvælvingen, som fladeelementet "ser", må man altså multiplicere  $\varepsilon'_G$  med  $1/\varphi$ , hvor  $\varphi$  er fladeelementets vinkelforhold til himmelhvælvingen.

$$\varepsilon_G = \varepsilon'_G \frac{1}{\varphi} \quad (28)$$

Bestemmer man vinkelforholdet  $\varphi$  ved hjælp af rumvinkelprojektion, finder man umiddelbart

$$\varphi = \frac{1}{2} (1 + \sin\gamma) \quad (29)$$

thi rumvinklens projektion på fladeelementets plan bliver en halvcirkel med radius lig  $1/2$  og en halvellipse med den halve storakse lig  $1/2$  og den halve lilleakse lig  $1/2 \sin\gamma$ . Projektionsarealet er altså lig  $\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \sin\gamma$ . Idet  $\varphi$  er lig forholdet mellem projektionsarealet og enhedscirkelns areal, er  $\varphi$  bestemt ved (29).

Når himmelhvælvingen er helt dækket af skyer, svarer den langbølgede stråling fra denne til, at  $\vartheta_h = \vartheta_1$ . Når himmelhvælvingen er delvis overskyet, ligger dens temperatur et sted mellem  $\vartheta_h$  for skyfri himmel og  $\vartheta_1$ , afhængig af hvor stor en del af himmelhvælvingen, der er dækket af skyer.

### Den resulterende strålingstemperatur i det fri

I ligning (21) og (27) indgår strålingstemperaturen både fra himmelhvælving og jordoverflade. Ved behandlingen af måleresultaterne kan arbejdet forenkles, hvis de to strålingstemperaturer sammensættes til en resulterende strålingstemperatur  $\vartheta_R^s$  for det fri, som alene er bestemt af lufttemperaturen, fladens hældning og vanddamptrykket.

Vi gør den tilnærmelse at sætte  $M_h = M_\gamma = M$  i (20) og (21). Heraf følger:

$$\vartheta_R^s = \varphi \vartheta_h + (1-\varphi) \vartheta_1 \quad (30)$$

$$M_R^s = M$$

Modstanden  $M_R^s$  bestemmes af  $M = \frac{1}{c} \vartheta_s$ , hvor  $\vartheta_s$  er bestemt af  $\vartheta_R^s$ . Her- ved begås en fejl [22], men denne fejl er i dette temperaturområde kun principiel og har ingen praktisk betydning.

Fejlen, man begår, ved at sætte  $M_h = M_Y$ , bliver følgende:

$$\vartheta_R^s - \vartheta_R^s = \left[ \frac{\varphi \vartheta_h}{M_h} + \frac{(1-\varphi) \vartheta_1}{M_Y} \right] \left[ \frac{1}{\frac{\varphi}{M_h} + \frac{1-\varphi}{M_Y}} \right] - \varphi \vartheta_h - (1-\varphi) \vartheta_1$$

Fejlen er størst når  $\varphi = 0,5$

$$\vartheta_R^s - \vartheta_R^s = \left[ \frac{\vartheta_h}{M_h} + \frac{\vartheta_1}{M_Y} \right] \left[ \frac{1}{\frac{1}{M_h} + \frac{1}{M_Y}} \right] - 0,5 \vartheta_h - 0,5 \vartheta_1$$

Dette udtryk reduceres til

$$\vartheta_R^s - \vartheta_R^s = \frac{0,5(M_Y - M_h)(\vartheta_h - \vartheta_1)}{M_Y + M_h} \quad (31)$$

I det temperaturområde, hvori der arbejdes her, er  $(M_Y - M_h) \sim -0,02$ ,  $M_Y + M_h \sim 0,4$  og  $\vartheta_h - \vartheta_1 \sim -13$  °C ved 16 mmHg og -28 ved 2 mmHg. Dette giver

$$\vartheta_R^s - \vartheta_R^s \sim 0,3 \text{ °C ved } 16 \text{ mmHg (og } \vartheta_1 = 20 \text{ °C)}$$

$$\vartheta_R^s - \vartheta_R^s \sim 0,7 \text{ °C ved } 2 \text{ mmHg (og } \vartheta_1 = 20 \text{ °C)}$$

Ved lavere lufttemperaturer bliver fejlen mindre. Når usikkerheden på  $\vartheta_h$  tages i betragtning, er denne tilnærmelse uden betydning.

Ved hjælp af (13), (28) og (30) er sammenhæng mellem den resulterende strålingstemperatur i det fri og lufttemperaturen afbildet som funktion af fladens hældning  $\gamma$  i forhold til lodlinien og vanddamptrykket. Det ene sæt kurver gælder for  $\vartheta_1 = 20$  °C og det andet sæt for  $\vartheta_1 = 0$  °C (fig. 79).

Ligning (26) og (27) kan nu erstattes af

$$\frac{1}{M_{R,u}} = \frac{1}{M_u^k} + \frac{1}{M_{R,u}^s} \quad (32)$$

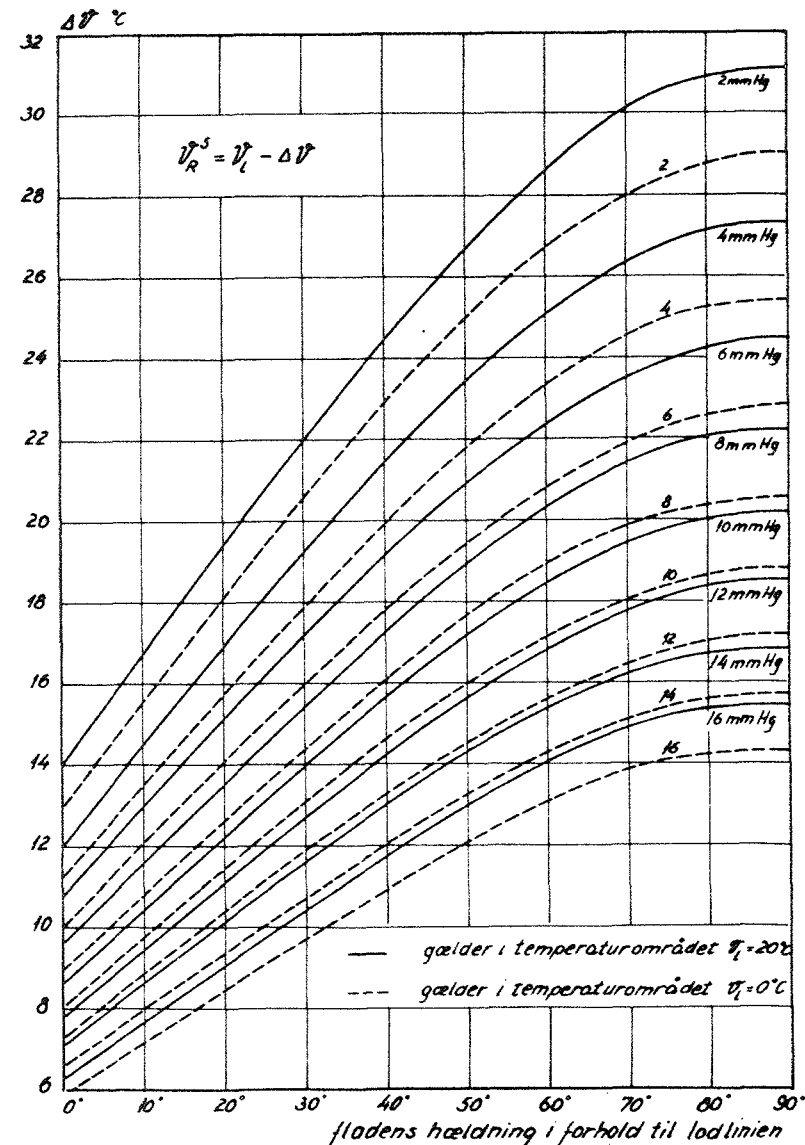


Fig. 79. Strålingstemperaturen i det fri (langbølget stråling) i klart vejr som funktion af fladens hældning med lodret, vanddamptrykket og lufttemperaturen.

The temperature of the radiation in the open (low temperature radiation) in clear weather as function of the inclination of the plane, water vapour pressure and the air-temperature.

$$\vartheta_{R,u} = \left[ \frac{\vartheta_1}{M_k} + \frac{\vartheta_{R,u}^s}{M_{R,u}^s} \right] M_{R,u} \quad (33)$$

#### Glasfladens varmeveksling med kalorimetret

Idet væggene i kalorimetret benævnes 1, 2, 3, 4 og 5, udledes på analog måde af (1) følgende ligning for glasfladens resulterende varmeveksling med kalorimetret:

$$H_{R,i} = \frac{\vartheta_{R,i} - \vartheta_{g,i}}{M_{R,i}} \quad [\text{kcal/hm}^2] \quad (34)$$

$$\text{hvor } \frac{1}{M_{R,i}} = \frac{1}{M_i^k} + \frac{\varphi_1}{M_1} + \frac{\varphi_2}{M_2} + \dots + \frac{\varphi_5}{M_5} \quad (35)$$

$$\vartheta_{R,i} = \left[ \frac{\vartheta_{1,i}}{M_i^k} + \frac{\varphi_1 \vartheta_1}{M_1} + \frac{\varphi_2 \vartheta_2}{M_2} + \dots + \frac{\varphi_5 \vartheta_5}{M_5} \right] M_{R,i} \quad [^\circ\text{C}] \quad (36)$$

Da temperaturforskellen mellem siderne ikke er store, kan vi med tilnærmelse sætte  $M_1 = M_2 = \dots = M_5 = M_{R,i}^s$ . Vi har da

$$\vartheta_{R,i} = \left[ \frac{\vartheta_{1,i}}{M_i^k} + \frac{\varphi_1 \vartheta_1 + \varphi_2 \vartheta_2 + \dots + \varphi_5 \vartheta_5}{M_{R,i}^s} \right] M_{R,i} \quad [^\circ\text{C}] \quad \text{hvor} \quad (37)$$

$$\frac{1}{M_{R,i}} = \frac{1}{M_i^k} + \frac{1}{M_{R,i}^s} \quad (38)$$

Ved varmevekslingen mellem kalorimeteroverfladen og glasruden indgår fladerne med en endelig størrelse. Det virksomme strålingstal  $c_{gk}$  for strålingen mellem de to overflader er udtrykt ved

$$c_{gk} = \frac{1}{\frac{1}{c_g} + \frac{A_g}{A_k} \left[ \frac{1}{c_k} - \frac{1}{c_s} \right]} \quad \text{hvor} \quad (39)$$

$c_g$  og  $c_k$  er strålingstallet for henholdsvis glasoverfladen og kalorimeteroverfladen, og  $A_g$  og  $A_k$  er de respektive overfladearealer.

Ved udledelsen af (34), (35) og (36) har vi forudsat, at kalorimeteroverfladen var absolut sort, d.v.s.  $c_{gk} = c_g$ . For den sorte overflade har vi imidlertid  $\epsilon_k = 0,95$  eller  $\frac{1}{c_k} = 0,212$  og for glasoverfladen  $\epsilon_g = 0,94$  eller  $\frac{1}{c_g} = 0,215$ .

$$\frac{1}{c_{gk}} = 0,215 + \frac{2}{8} (0,212 - 0,202) = 0,218$$

Forskellen mellem det virksomme strålingstal, når kalorimeterfladen regnes absolut sort, og når den regnes med normal emissionsforhold, er ca. 1% og uden praktisk betydning.

#### Transmissionstab gennem glasruden

Transmissionstabet  $H_t$  gennem en væg kan beskrives ved følgende udtryk

$$H_t = \frac{\vartheta_{R,u} - \vartheta_{g,u}}{M_{R,u}} = \frac{\vartheta_{g,u} - \vartheta_{g,i}}{M_g} = \frac{\vartheta_{g,i} - \vartheta_{R,i}}{M_{R,i}} \quad (40)$$

hvor  $M_g$  er modstandstallet for væggen. Heraf fås umiddelbart

$$H_t = \frac{\vartheta_{R,u} - \vartheta_{R,i}}{M_{R,u} + M_g + M_{R,i}} \quad [\text{kcal/hm}^2] \quad (41)$$

Ved beregning af transmissionstabet gennem glasruden findes  $\vartheta_{R,u}$ ,  $M_{R,u}$ ,  $\vartheta_{R,i}$  og  $M_{R,i}$  af (32), (33), (37) og (38).

Når glasset er udsat for en kortbølget stråling, absorberes noget af denne, hvorved ruderne antager en højere temperatur end svarende til en normal transmissions ligevægtstilstand. Den varmetransport, som sker gennem ruderne på grund af denne opvarmning, hører ikke med til transmissionstabet, men er en del af den transmitterede solstråling. Rudernes overfladetemperaturer giver således ikke noget billede af transmissionstabet i dette tilfælde.

## APPENDIX B

Måling af strålingstemperaturen i det fri

Strålingstemperaturen i det fri (langbølget stråling) er forsøgt målt en dag med skyfri himmel ved hjælp af en strålingstemperaturmåler, der er konstrueret af V. Korsgaard [24] [25]. Målingen blev foretaget samtidig med kalorimetermålingerne.

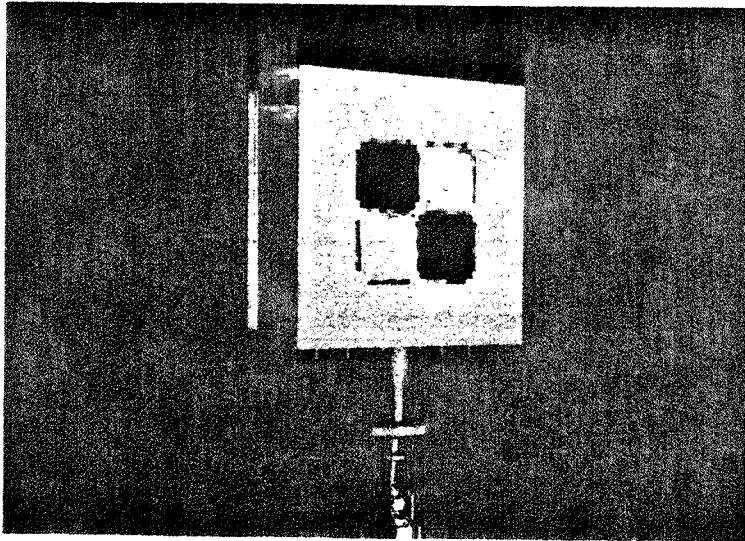


Fig. 80. Strålingstemperaturmåler.  
Low temperature radiation meter.

Måleren (fig. 80) har to blanke og to sorte felter. Temperaturforskellen mellem disse samt deres middeltemperatur er et direkte mål for strålingstemperaturen for det halvrum, fladen "ser".

Da det kun er den langbølgede stråling fra halvrummet, man er interesseret i, kan måleren ikke benyttes i dagslys, med mindre man kan borteliminere den kortbølgede stråling. Dette gøres på den måde, at man først måler strålingstemperaturen fra det givne halvrum gennem en enkelt glasrude med kendt temperatur og derefter måler strålingstemperaturen uden anvendelse af glasruden.

Idet der er en eentydig forbindelse mellem halvrummets strålingstemperatur og strålingsintensiteten fra dette, kan man på grundlag

af de to målinger beregne strålingsintensiteten fra halvrummet i det fri i det langbølgede område og dermed bestemme strålingstemperaturen.

Når måleren ikke dækkes af glasfladen, er den registrerede strålingstemperatur bestemt af intensiteten af den langbølgede stråling fra det fri og af intensiteten af den kortbølgede stråling.

Når måleren dækkes af glasfladen, er den registrerede strålingstemperatur bestemt af intensiteten af den langbølgede stråling, som udsendes fra glasfladen, og intensiteten af den kortbølgede stråling, som transmitteres gennem glasset.

Den kortbølgede stråling, som rammer måleren, når denne ikke er dækket af glasfladen, kan da beregnes, når glassets transmissionskoefficient for den kortbølgede stråling er kendt. Man kan derefter beregne strålingsintensiteten svarende til den langbølgede stråling fra det fri og dermed også strålingstemperaturen.

Resultatet af målingen den pågældende dag er sammenlignet med de strålingstemperaturer, man skulle forvente ifølge fig. 79.

|                               |     |     |     |        |
|-------------------------------|-----|-----|-----|--------|
| målt strålingstemperatur:     | 1,5 | 6,0 | 6,6 | 5,5 °C |
| beregnet strålingstemperatur: | 4,3 | 5,0 | 2,0 | 2,8 °C |

Målefladens hældning med lodret er mellem 17° og 25°, og lufttemperaturen er 18-20 °C.

Strålingstemperaturen blev endvidere målt om natten ved skyfri himmel. Ved disse målinger er man fri for den kortbølgede stråling, men til gengæld afkøles målefeltet så meget, at det sommetider når under dugpunktet. Ved en lufttemperatur på 12,7 °C blev der således målt en strålingstemperatur på -2,7 °C. Iflg. fig. 79 skulle den ved pågældende lufttemperatur og fugtighed være -6 °C. Måleren blev imidlertid dækket af dug, inden ligevægtstilstanden var nået. Strålingstemperaturen på den lodrette plan blev målt til 4,0 °C imod den beregnede værdi på 2,4 °C.

Uoverensstemmelserne mellem de målte og beregnede strålingstemperaturer skyldes dels måleusikkerheden, men en stor del skyldes også, at den empiriske formel bygger på lufttemperaturen og vanddamptrykket ved jordoverfladen, mens strålingstemperaturen i virkeligheden er afhængig af lufttemperaturen og vanddampindholdet et stykke op i atmosfæren.

føren. Da der ikke er foretaget systematiske undersøgelser af udstrålingen til himmelhvælvingen i Danmark, har man ingen tal for, hvor store afvigelserne er mellem de beregnede (fig. 79) og de virkelige strålingstemperaturer.

## APPENDIX C

### Justering af termoelementtråden

Når en kobbertråd og en konstantantråd loddes sammen, vil der være en kontaktpotentialforskel mellem de to metaller, og denne er en funktion af loddestedets temperatur. Lodder man således to kobbertråde sammen med en konstantantråd (fig. 81), vil den elektromotoriske kraft mellem A og B være en funktion af de to loddesteders temperatur. Hvis det ene loddested holdes på  $0^{\circ}\text{C}$ , og det andet varierer, kan man bestemme den elektromotoriske kraft EMK som funktion af det varme loddesteds temperatur, (termoelementtrådens karakteristik) fig. 81. Hvis det kolde loddested ikke har temperaturen  $0^{\circ}\text{C}$ , men  $\vartheta_2$ , bliver den målte værdi af EMK lig med  $E_1 - E_2$ . For at kunne bestemme  $\vartheta_1$  efter karakteristikken må man først finde  $E_2$  svarende til det kolde loddesteds temperatur og addere denne til  $E_1 - E_2$ .

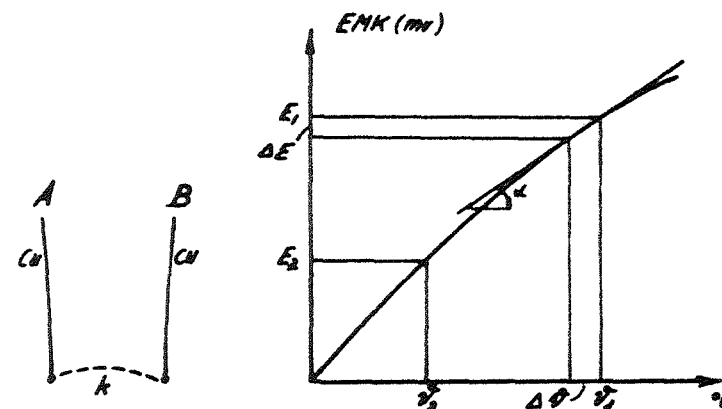


Fig. 81. Termoelement.  
Thermocouple.

Over et lille temperaturinterval  $\Delta\vartheta$  kan karakteristikken erstattes af en ret linie, d.v.s. tilvæksten af den elektromotoriske kraft  $\Delta E$  bliver proportional med temperaturstigningen

$$\Delta\vartheta = \alpha \cdot \Delta E \quad (1)$$

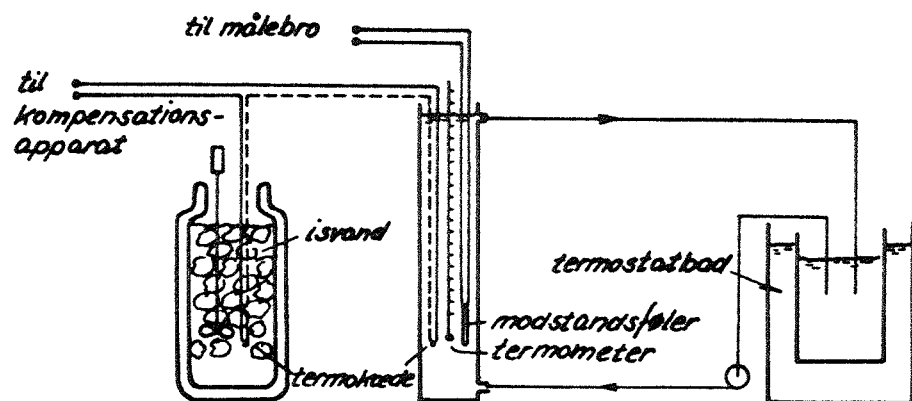


Fig. 82. Principskitse af forsøgsopstilling ved justering af termoelement-tråd.

A simplified diagram of a test set-up for calibration of thermocouple wire.

Opvarmningen af vandet, som gennemstrømmer kalorimetercellen, er af størrelsesordenen  $2^{\circ}\text{C}$ . Hvis  $\alpha$  kendes og  $\Delta E$  måles, kan temperaturstigningen findes af ligning 1.

Karakteristikhældningen  $\alpha$  bestemmes ved justering. Forsøgsopstilling til justeringen er skematisk vist på fig. 82. Termoelementkæden (20 elementer i serie), der er den samme som den, der benyttes i kalorimetret, har det kolde loddested i et isbad af  $0^{\circ}\text{C}$ , mens det varme loddested sidder i et rør med en vandstrøm, hvis temperatur holdes konstant ved hjælp af et termostatbad.

Vandtemperaturen ved  $10,0$ ,  $20,0$  og  $30,0^{\circ}\text{C}$  bestemmes ved hjælp af et justeret termometer med  $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$  nøjagtighed. Med en platintrådsmodstandsføler med kendt karakteristikhældning inddeles temperaturintervallerne på  $10^{\circ}\text{C}$  i intervaller på  $2^{\circ}\text{C}$ . Modstanden måles ved hjælp af en målebro, mens termospændingen måles ved hjælp af et kompensationsapparat.

Idet der måles sammenhørende værdier af  $\Delta\theta$  og  $\Delta E$ , bestemmes karakteristikhældningen af ligning 1. Resultatet er afbildet grafisk på fig. 83.

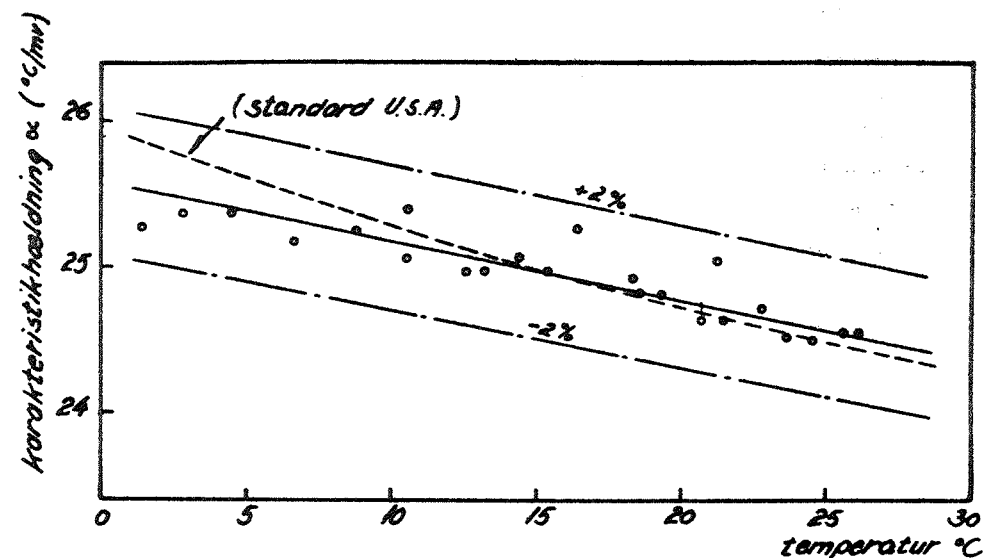


Fig. 83. Forsøgsresultater af termoelementtrådens karakteristikhældning.  
Test results of the characteristic inclination of the thermocouple wire.

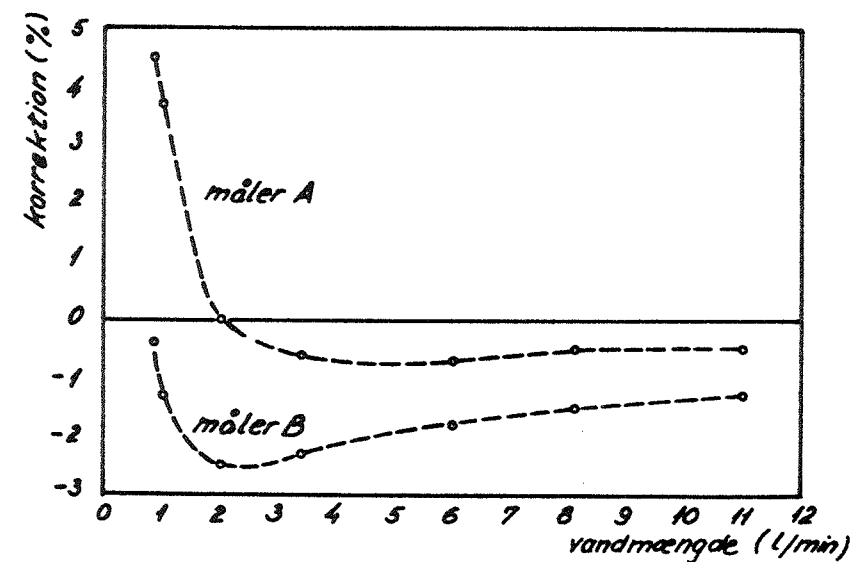


Fig. 84. Justeringskurve for vandmålerne.  
Calibration-curve for the water meter.

### Justering af vandmålere

Størrelsen af den cirkulerende vandmængde måles ved hjælp af to ringstempelmålere. Disse justeres på den måde, at den vandmængde, der løber igennem målerne, bestemmes ved vejning. Justeringen foretages ved 10 °C. I det temperaturinterval, hvori målerne benyttes, er den fejl, man begår ved ikke at tage hensyn til udvidelsen af vandet og måleren, uden betydning. Fig. 84 viser resultatet af de målte korrektioner til de to vandmåleres visning som funktion af belastningen.

Da rigtigheden i vandmålerens visning er afgørende for kalorimetrets funktion, justeres disse med mellemrum, idet korrektionerne kan ændre sig med tiden.

### APPENDIX D

#### Beregning af den diffuse strålings transmission gennem en dobbeltrude

Det antages, at den diffuse stråling er jævnt fordelt over hele himmelhvalvingen. Den udsendte stråling har intensiteten  $H$ . Et vandret fladeelements rumvinkel til himmelhvalvingen er  $2\pi$ . Ifølge rumvinkelprojektionssætningen vil strålingsintensiteten på fladeelementet da være  $\pi H$ .

Hvis man lægger en termorude over fladeelementet, vil kun en brøkdel af denne stråling ramme dette. Den transmitterede stråling er afhængig af indfaldsvinklen og bliver således forskellig fra hver del af himmelhvalvingen. Man tænker sig nu himmelhvalvingen opdelt i  $n$  kuglebælter med en sådan højde, at de alle bidrager lige meget med strålingen til fladeelementet, altså  $\frac{1}{n} \cdot \pi \cdot H$ . Projektionen af rumvinklerne, hvorunder fladeelementet "ser" bælterne, bliver altså cirkelringe med lige store arealer. Arealet af en cirkelring er

$$\pi(r_{p+1}^2 - r_p^2) = \pi \cdot \frac{1}{n}$$

$$\text{eller} \quad r_{p+1}^2 = r_p^2 + \frac{1}{n}$$

Den transmitterede strålingsintensitet fra det  $p$ 'te kuglebælte bliver da

$$\frac{1}{n} \cdot \pi \cdot H \cdot T_{ap},$$

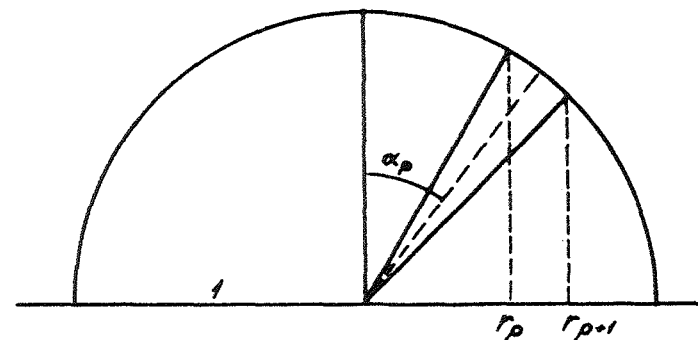


Fig. 85.



idet  $T_{\alpha p}$  er den brøkdel, som transmitteres gennem dobbeltruden ved indfaldsvinklen  $\alpha_p$  ( $\alpha_p$  bestemmes af  $\sin \alpha_p = \frac{1}{2}(r_p + r_{p+1})$ ). Den samlede transmitterede strålingsintensitet bliver da

$$H_{d,trans} = \sum_{p=0}^{n-1} \frac{1}{n} \cdot \pi \cdot H \cdot T_{\alpha p} = \frac{\pi H}{n} \sum_{p=0}^{n-1} T_{\alpha p}$$

For  $n = 20$  og  $T_{\alpha p}$  bestemt efter fig. 15 får man

$$H_{d,trans} = \frac{\pi \cdot H}{20} \cdot 12,63 = 0,63 \cdot \pi H$$

Da den indfaldne strålingsintensitet var  $\pi \cdot H$ , bliver transmissionsfaktoren for den diffuse stråling altså 0,63.

## RESUMÉ

Den solstråling, som når ned til jordoverfladen, er en meget variabel størrelse både med hensyn til spektralfordelingen, intensiteten og forholdet mellem den direkte og diffuse stråling. Til belysning af dette er her kort beskrevet solstrålingens natur uden for og i atmosfæren samt den stråling, man kan forvente rammer en flade ved jordoverfladen.

Ved brug af fysikkens love om en monokromatisk strålings refleksion og absorption i et stof er transmissionskoefficienten for en almindelig dobbeltrude beregnet som funktion af strålingens indfaldsvinkel. Transmissionskoefficienten er desuden målt ved hjælp af solarimetre.

Til måling af størrelsen af solindfaldet gennem en given vindueskonstruktion og især til bestemmelse af vindueskonstruktionens afskrænningsfaktor benyttes et solkalorimeter, der er konstrueret og bygget ved Laboratoriet for Varmeisolering. Kolorimetret har to ens celler, der er 2 m høje, 1 m brede og 1 m dybe. Cellens ene side udgøres af vindueskonstruktionen, mens de øvrige sider er sortmalede aluminiumsplader, som absorberer den transmitterede stråling. Pladerne er forsynet med et net af kolerør, således at den transmitterede varme kan fjernes, ved at man lader vand cirkulere gennem disse. De to celler sidder side om side i en velisoleret kasse, der kan dreje om en lodret og vandret akse. Den absorberede varme bestemmes ved måling af den cirkulerende vandmængde og dennes temperaturstigning ved passage af kalorimetret.

Ved forsøg med indvendige afskrænninger, hvor konvektionsbidraget bliver betydeligt, kan denne varme fjernes ved ventilation af cellen, idet luften blæses ind gennem dyser i loftet og fjernes gennem en åbning i gulvet. Varmemængden, som fjernes med ventilationsluften, bestemmes ved en effekt- og temperaturmåling. Efter at ventilationsluften har forladt kalorimetercellen, opvarmes den yderligere ved passage af et varmelegeme i form af et gitter af konstantantråd. Idet trådens afgivne effekt måles, kan man ved at sammenligne temperaturstigningen på luften, når denne passerer henholdsvis kalorimetret og varmetråden, beregne den varmemængde, ventilationsluften fjerner fra kalorimetret.

Til måling af den kortbølgede stråling, som transmitteres gennem vindueskonstruktionen, er der monteret et solarimeter i hver celle.

Ved målingerne er den ene celle forsynet med en almindelig dobbeltrude, mens den anden er forsynet med den vindueskonstruktion, der skal undersøges, således at man direkte kan sammenligne solindfaldet gennem det afskærmede og uafskærmede vindue. Solkalorimetret er kalibreret, og usikkerheden på den registrerede varmemængde er 2% ved solindfald på  $500 \text{ kcal/hm}^2$  og 6% ved solindfald på  $50 \text{ kcal/hm}^2$ .

I sommerhalvåret 1965 er der foretaget målinger på 4 forskellige solafskærmninger. Resultaterne er afbildet grafisk.

Endelig er der vist nogle eksempler på anvendelsen af måleresultaterne samt udarbejdet nogle diagrammer, ved hjælp af hvilke man på en enkel måde kan bestemme det totale solindfald, som rammer en lodret væg eller transmitteres gennem en almindelig dobbeltrude.

## SUMMARY

The spectral distribution, the intensity and the ratio of the direct and diffuse components of the solar radiation falling on a surface are all subject to great variation. To illustrate this the solar radiation outside the atmosphere, inside the atmosphere and incident on a surface are all briefly described.

The transmission coefficient of double glazing as a function of the angle of incidence is computed by using the laws of reflection and absorption of monochromatic radiation. Measurements of transmission coefficient using solarimeters are described.

A solar calorimeter, constructed at the Thermal Insulation Laboratory in the Technical University of Denmark, has been used to measure solar radiation passing through a given fenestration, and in particular to calculate its shading coefficient. The calorimeter has two identical cells, each two metres high, one metre wide and one metre deep. The front of each cell consists of the fenestration, while the other sides are aluminium plates painted black to absorb the transmitted radiation. These plates are backed by a network of cooling tubes so that absorbed heat can be removed by circulating water. The two cells are mounted side by side in a well insulated box which can be rotated horizontally and vertically to point in any chosen direction. The amount of heat absorbed is computed from calorimetric measurements on the cooling water.

For experiments with inside shading where the heat gain from convection is appreciable, this heat is removed by ventilating the cell. Air is blown into the cell through nozzles in the ceiling and removed through an opening in the floor. The amount of heat removed by the ventilating air is measured by passing the air, after it has left the cell, over an electrically heated constantan grill. By measuring the heat dissipated by the grill, and comparing the rise in air temperature across the cell and across the grill, the heat gain in the cell can be calculated. A solarimeter is installed in each cell to measure the transmitted short wave radiation.

During the experiment, one cell is fitted with ordinary double glazing while the other is fitted with the glazing and shading device

under investigation, so that a direct comparison of the transmitted solar radiation in the two cases is possible. The calorimeter has been calibrated, and the error in the measured quantity of heat is 2% for a solar heat gain of  $500 \text{ kcal/hm}^2$ , and 6% for  $50 \text{ kcal/hm}^2$ .

During the six months of the summer of 1965 measurements were made on four different shading devices. The results are shown graphically.

Finally, some uses of the results obtained are given, and some diagrams are drawn using which the total solar radiation falling on a vertical wall and the radiation transmitted through ordinary double glazing can easily be calculated.

Nærværende arbejde er udført på Laboratoriet for Varmeisolering, D.T.H. med professor, civilingeniør Vagn Korsgaard som faglærer.

Lyngby den 1-5-1966.

Erwin Petersen.

## SYMBOLLISTE

|                      |   |
|----------------------|---|
| H                    | strålingsintensitet eller specifik varmestrøm $\text{kcal/hm}^2$                      |
| Q                    | varmestrøm $\text{kcal/h}$  |
| $\vartheta$          | temperatur $^{\circ}\text{C}$   |
| $\Delta\vartheta$    | temperaturdifferens $^{\circ}\text{C}$ , eller temperaturændring $^{\circ}\text{C/h}$ |
| M                    | modstandstal $^{\circ}\text{Chm}^2/\text{kcal}$                                       |
| $\theta$             | temperaturfaktoren $^{\circ}\text{C}^{-3}$  |
| c                    | strålingstal $\text{kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}^4$                              |
| $\epsilon$           | emissionsforholdet  |
| A                    | areal $\text{m}^2$ , eller absorptionskoefficient                                     |
| R                    | refleksionskoefficient  |
| T                    | transmissionskoefficient  |
| F                    | afskærmningsfaktor  |
| $\varphi$            | vinkelforholdet eller profilvinklen   |
| i                    | indfaldsvinklen   |
| h                    | solhøjden   |
| $\gamma$             | hældningsvinklen  |
| $\alpha_v, \alpha_s$ | væg-, solazimuthvinklen   |
| $\beta$              | væg-solazimuthvinklen   |

## Indeks

|                            |  |                  |                   |
|----------------------------|--|------------------|-------------------|
| ( ) <sub>D</sub>           | direkte                                | ( ) <sup>U</sup> | uafskærmet vindue |
| ( ) <sub>D,n</sub>         | direkte, vinkelret på strålingsretning | ( ) <sup>E</sup> | enkelt rude       |
| ( ) <sub>d</sub>           | diffus                                 | ( ) <sup>R</sup> | retnings-         |
| ( ) <sub>d,l</sub>         | diffus på lodret væg                   | ( ) <sup>i</sup> | indvendig         |
| ( ) <sub>d,v</sub>         | diffus på vandret plan                 | ( ) <sup>u</sup> | udvendig          |
| ( ) <sub>d,r</sub>         | diffus reflekteret stråling på en væg  | ( ) <sup>g</sup> | glas              |
| ( ) <sub>k</sub>           | kortbølget                             | ( ) <sup>h</sup> | himmel            |
| ( ) <sub>w</sub>           | el-effekt i $\text{kcal/h}$            | ( ) <sup>j</sup> | jord              |
| ( ) <sub>r</sub>           | registreret                            | ( ) <sup>s</sup> | stråling          |
| ( ) <sup>a</sup> (eller b) | kalorimeter a eller b                  | ( ) <sup>k</sup> | konvektion        |
| ( ) <sup>A</sup>           | afskærmet vindue                       |                  |                   |

## LITTERATURFORTEGNELSE

- [1] P. MOON: Proposed Standard Solar-radiation Curves for Engineering Use. The Journal of the Franklin Institute. Nov. 1940.
- [2] G. PLEIJEL: The Computation of Natural Radiation in Architecture and Town Planning. SNB. Medd. nr. 25. Stockholm 1954.
- [3] G. PLEIJEL: Solinstrålning genom fönster. SNB. Medd. nr. 94. Stockholm 1963.
- [4] F.M. TONNE und W. NORMANN: Die Berechnung der Sonnenwärmestrahlung auf senkrechte und beliebig geneigte Flächen unter Berücksichtigung meteorologischer Messungen. Mitt. Nr. 8 - Juni 1961. Institut für Tageslichttechnik Stuttgart.
- [5] G. NEHRING: Über den Wärmefluss durch Aussenwände und Dächer in klimatisierte Räume infolge der periodischen Tagesgänge der bestimmenden meteorologischen Elemente. Gesundheits-Ingenieur, 7,8,9, 1962.
- [6] J.L. THRELKELD: Solar Irradiation of Surfaces on Clear Days. ASHRAE Journal, Nov. 1962.
- [7] J.I. YELLOTT: Selective Reflectance - A New Approach to Solar Heat Control. ASHRAE Journal. Jan 1964.
- [8] ASHRAE Guide and Data Book, Fundamentals and Equipment 1961 og 1965.
- [9] J.C. BOREL: La protection des baies vitrées contre le soleil. Cahiers du centre scientifique et technique du batiment, No 55. Paris 1962.
- [10] TH. LUND MADSEN: Måling af solindfaldet gennem forskellige typer varmeabsorberende vinduesruder. Ingeniøren nr. 3, København 1962.
- [11] V. KORSGAARD, M.R. BYBERG: El-modeller til beregning af flerdimensionale varmestømme i bygningskonstruktioner. Ingeniøren nr. 6, København 1965.
- [12] N. OZISIK, L.F. SCHUTRUM: How Drapes Affect Heat Gain. ASHRAE Journal. June 1960.

- [13] E.A. FARBER, W.A. SMITH, C.W. PENNINGTON, J.C. REED: Theoretical Analysis of Solar Heat Gain Through Insulating Glass with Inside Shading. ASHRAE Journal. Aug. 1963.
- [14] C.W. PENNINGTON, W.A. SMITH, E.A. FARBER, J.C. REED: Experimental Analysis of Solar Heat Gain Through Insulating Glass with Indoor Shading. ASHRAE Journal. Feb. 1964.
- [15] G.W. PARMELEE, W.W. AUBELE: The Shading of Sunlit Glass, Heating, Piping and Air Conditioning, June 1952.
- [16] G. BROWN, T. TUOMINEN: Solar Position at Various Hours Dates and Latitudes - Tables. Statens Råd för byggnadsforskning Rapport 75. Stockholm 1962.
- [17] G. BROWN: Solvärme genom fönster, Svensk VVS nr. 2, 1966.
- [18] MATTS BÄCKSTRÖM: Kälteteknik, Verlag G. Braun, Karlsruhe.
- [19] J. ANQUEZ, J.-C. BOREL, M. CROISET: La protection solaire des baies vitrées. Cahiers du centre scientifique et technique du batiment No 72. Paris 1965.
- [20] A. ÄNGSTRÖM: Människans värmeomsättning genom strålning i det fria. JVA Meddelande nr. 118, 1942.
- [21] T.S. HOLDEN: Calculation of Incident Low Temperature Radiation Upon Building Surfaces, ASHRAE Journal, April 1961.
- [22] P.W. MARKE: Sammensætning af parallelle varmestømme. Ingeniøren nr. 36, København 1953.
- [23] P.W. MARKE: Strålingsforholdene i det fri. Ingeniøren nr. 46, København 1953.
- [24] V. KORSGAARD: Undersøgelse over det termiske strålingsfelt i rum med reflekterende vægge. Medd. 12. Lab. f. opv. og vent. D.T.H., København.
- [25] V. KORSGAARD: A New Radiometer Measuring Directional Mean Radiant Temperatures. ASHRAE Journal Section, Heating, Piping and Air Conditioning, July 1949.

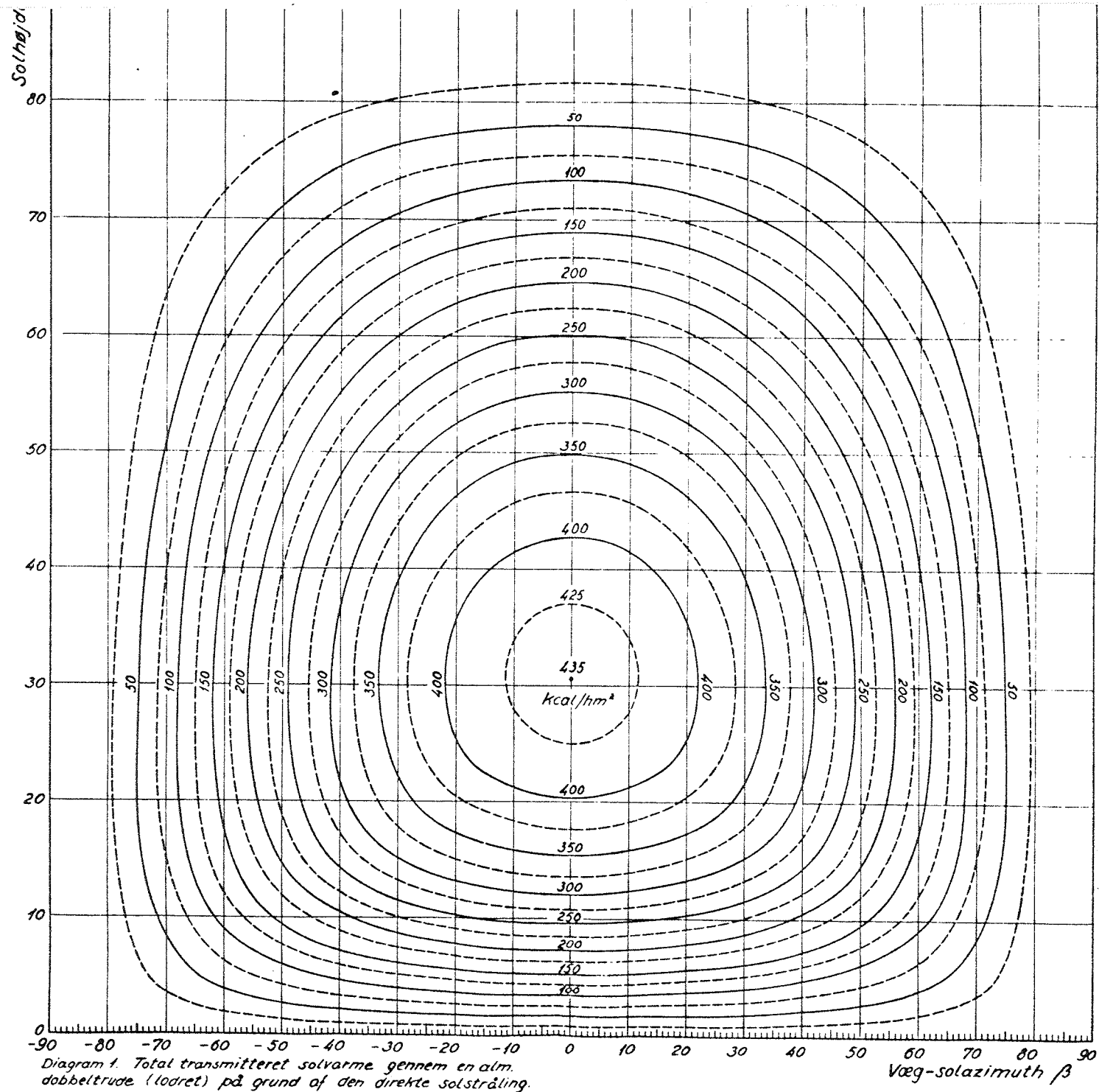


Diagram 1. Total transmitteret solvarme gennem en alm. dobbelttruede (lodret) på grund af den direkte solstråling.

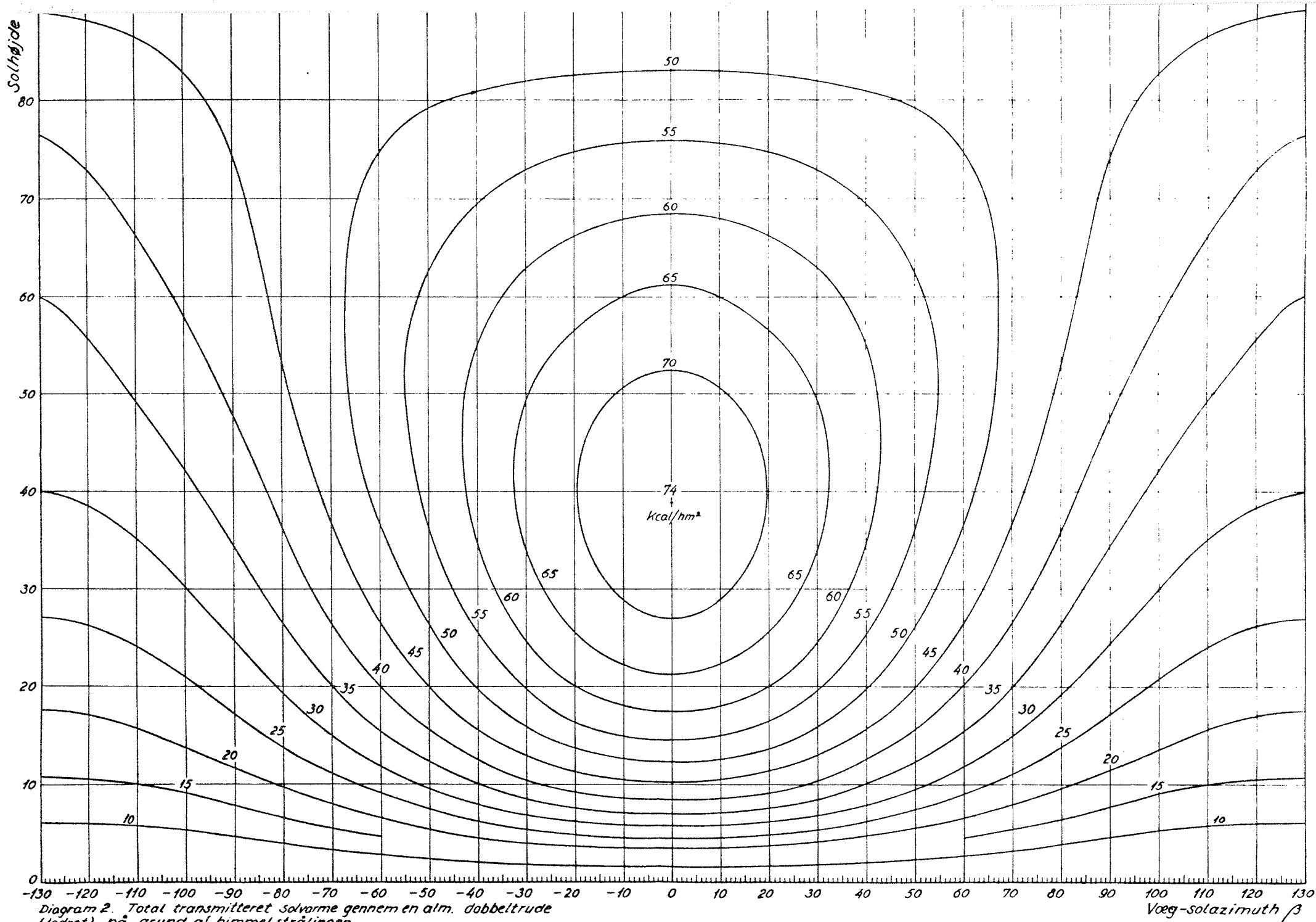


Diagram 2. Total transmitteret solvarme gennem en alm. dobbeltrude (lodret) på grund af himmelstrålingen.

